ESTUDIO COMERCIAL, BIBLIOGRÁFICO Y ECONÓMICO

Feedstocks comerciales para MIM y CIM en moldes fotopolimerizados

Carga de polvo, extracción del ligante, compatibilidad de proceso y coste por pieza aceptada

Juan Segurola, PhD
3Dresyns by Resyner Technologies S.L.
Versión de estudio 1 · ES · Actualización bilingüe: 8 de noviembre de 2026

Conclusión. La ampliación es técnicamente pertinente. El valor del estudio reside en seleccionar y comparar combinaciones concretas de feedstock, molde y retirada, con datos trazables y límites explícitos. La evidencia disponible no permite declarar que un único ligante, molde o sistema de extracción sea superior para todos los metales y cerámicas.

Se reúnen 19 entradas comerciales agrupadas de 11 proveedores, 19 registros sobre carga o extracción y 51 referencias. Se distinguen granzas listas para moldear, ligantes para formular, suspensiones y rutas de impresión directa. El foco industrial son los moldes duraderos y sacrificables fabricados por SLA, DLP o LCD, incluidas plataformas económicas cuando su proceso esté cualificado.

El análisis utiliza como hipótesis del promotor, no como oferta de mercado, 40,00 EUR/kg para EB1 y 40,00 EUR/kg para IM-HDT-WS. Incluye conversiones masa-volumen, un modelo de costes por etapas y la reproducción de escenarios genéricos de bronce. No aporta ensayos nuevos ni demuestra equivalencia mecánica, disponibilidad de suministro o ahorro de una combinación comercial concreta.

Palabras clave: MIM; CIM; powder injection molding; feedstock; binder; debinding; moldes sacrificables; fotopolimerización; coste de calidad.

1. Alcance y separación respecto del trabajo anterior

La pregunta de este estudio es: **¿qué materiales comerciales y vías de extracción pueden utilizarse con moldes fotopolimerizados, bajo qué condiciones y con qué coste para obtener una pieza conforme?** La unidad de comparación es la pareja material-molde dentro de una cadena de fabricación, no una marca aislada.

Trabajo previo [1]	Ampliación desarrollada aquí
Estabilidad del molde durante llenado y retirada acuosa con extracción parcial del ligante.	Inventario comercial trazable de feedstocks, ligantes y suspensiones; denominadores y formulaciones identificados.
Modelo de deformación, pérdida de soporte y medición de la retirada.	Comparación entre rutas acuosa, con disolvente, catalítica y térmica; límites de traslado entre proveedores.
Propuesta de cualificación y marco de costes.	Normalización de cargas y precios, distinción entre costes por etapa y rendimiento global, cartera de pruebas por material.

La inyección en moldes sacrificables, su uso con varias cerámicas y la extracción acuosa ya tienen antecedentes [28-31]. Los fundamentos de PIM y las vías de extracción pertenecen a un campo consolidado, recogido en German y Bose y en los manuales de Heaney [39-41]; la revisión de Enneti aborda los problemas del desligado térmico [42]. Tampoco se presenta el coste por pieza aceptada como un principio nuevo. La aportación propuesta es organizar evidencia comercial heterogénea y relacionarla con compatibilidad, calidad y decisiones económicas reproducibles.

Basso estudia cómo la granulometría modifica la reología para PIM a baja presión [43]. Novák compara PIM, MEX y DMLS en acero 17-4PH [44]; no evalúa moldes fotopolimerizados. Estos antecedentes impiden presentar la integración general entre fabricación aditiva y PIM como una primicia.

Fronteras del análisis

MIM se refiere a moldeo por inyección de polvos metálicos y CIM a polvos cerámicos. PIM engloba ambos; IM es el término general de inyección. Se incluyen vidrio y materiales funcionales donde resultan pertinentes. La fundición se conserva como referencia para aleaciones metálicas concretas. Para cerámicas, los comparadores serán CIM convencional, prensado y mecanizado, colada o fabricación aditiva directa, según la geometría y la función.

El estudio es una revisión documental dirigida con escenarios económicos, no una revisión sistemática exhaustiva ni una validación de producto. No se contactó con proveedores ni se recibieron nuevas ofertas. La búsqueda inicial se cerró el 7 de noviembre de 2026; el 8 de noviembre se añadió la cobertura comercial de slurries con polvo y formulaciones a medida de 3Dresyns [48-51].

2. Método de revisión y fuerza de la evidencia

Se consultaron fuentes oficiales de fabricantes y estudios primarios que identifican material, formulación o proceso. Se registraron el grado comercial, la fecha de la fuente, la base del porcentaje y el alcance del acceso. Las tablas conservan la categoría del dato: publicado por el proveedor, medido en un estudio, calculado o supuesto.

Categoría	Qué permite afirmar	Qué no permite afirmar
Ficha o catálogo comercial	El fabricante declara un producto o proceso y unas condiciones indicativas.	Que todas sus prestaciones se hayan verificado de forma independiente o en moldes impresos.
Medida en estudio primario	Ese material o muestra produjo el resultado reportado bajo aquel protocolo.	Que el lote actual tenga igual composición o que el resultado cubra otra geometría.
Cálculo reproducible	Una consecuencia de los valores y supuestos declarados.	Que el proceso alcance el rendimiento o la densidad introducidos.
ND: no localizado	No se obtuvo el dato en el corpus consultado.	Que el fabricante no pueda suministrarlo bajo solicitud o acuerdo.

No se han reconstruido recetas propietarias a partir de nombres comerciales. Una ficha de seguridad puede omitir componentes no sujetos a declaración y presentar intervalos; no sustituye a una ficha de composición. Tampoco se interpreta la pureza del polvo o la densidad de la pieza sinterizada como porcentaje de sólidos del feedstock.

Cobertura y limitaciones

La selección cubre fabricantes de feedstocks metálicos y cerámicos, proveedores de ligantes y suspensiones para impresión directa. Glassomer se distingue como proveedor de materiales y soluciones de vidrio, sin presumir venta abierta de cualquier granulado. Fraunhofer IKTS se utiliza como fuente técnica y de desarrollo, no como catálogo de materias primas [22-23,34].

El registro de fuentes especifica los artículos con acceso parcial. Los datos de 2016, 2017 y 2019 se conservan como antecedentes fechados. La existencia de un PDF antiguo en una web no acredita que el mismo grado siga disponible. Los archivos CSV permiten sustituir un dato cuando exista una ficha o una oferta más reciente. De los manuales [39-41] se consultaron identificación, descripción o índice, no capítulos completos; [42] se utiliza sólo a partir de su resumen primario. Las nuevas comunicaciones [43-44] se recuperaron completas.

3. Granzas, ligantes y slurries: qué se está comprando

Formato	Contenido y función	Consecuencia para comparar
Granza o pellet MIM/CIM	Polvo y sistema ligante ya mezclados y granulados; se reblandecen para moldear.	El precio incluye polvo, ligante, formulación, homogeneización y control del proveedor.
Ligante comercial sin polvo	Sistema orgánico al que se añade el polvo elegido; ejemplos EB1, EB2G y ciertos Embemould.	Hay que sumar polvo, mezclado, granulación si procede, control de lotes y desarrollo.
Suspensión termoplástica caliente	Polvo disperso en un vehículo fundido, a menudo utilizado a menor presión.	Slurry no implica agua, fotocurado ni porcentaje bajo de ligante.
Suspensión acuosa o con disolvente	Polvo, líquido portador, dispersantes y, según ruta, ligante o gelificante.	La fracción no polvo incluye líquido; no equivale íntegramente a binder.
Suspensión fotopolimerizable	Polvo y fase reactiva que consolida mediante luz.	No se convierte en granza termoplástica por cambiar el molde. Debe existir acceso óptico y curado adecuado.
Granulado para prensado	Polvo aglomerado con aditivos para llenar y compactar una matriz.	Su forma de grano no acredita que sea un feedstock inyectable.

La comparación comercial debe especificar si se compra un producto listo para moldear, una formulación a medida, un ligante o un servicio de fabricación. No es válido comparar un kilogramo de EB1 con un kilogramo de Catamold como si ambos incorporasen la misma cantidad de metal [2-6,15-16].

En una cavidad cerrada y no porosa, una barbotina no consolida por el mismo mecanismo que en un molde absorbente. Habrá que diseñar gelificación, drenaje, extracción del vehículo u otro mecanismo. Una suspensión acuosa puede atacar un molde hidrosoluble durante el propio llenado. Estas son preguntas de compatibilidad que deben resolverse antes del cálculo de productividad.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

4. Porcentajes: cuatro denominadores distintos

Todo porcentaje debe ir acompañado de magnitud, denominador y método. El término binder se utiliza aquí para el sistema ligante, que puede contener polímeros, ceras, plastificantes y aditivos. La fracción no polvo solo puede llamarse íntegramente ligante cuando la formulación y el balance lo justifican.

Dato	Definición	Error que debe evitarse
Polvo en masa, w_p	Masa de polvo / masa total del feedstock.	Confundir 90 % en masa con 90 % en volumen.
Polvo en volumen, φ_p	Volumen de polvo / volumen total, según densidades y estado de referencia.	Convertir sin conocer la densidad efectiva del ligante.
Ligante extraído	Masa retirada respecto al ligante inicial o respecto a la pieza inicial: especificarlo.	Llamar 50 % de ligante a una pérdida del 50 % de una fracción soluble.
Sólidos secos en slurry	Fracción tras separar el vehículo bajo un método definido.	Asignar toda la pérdida de agua, solvente o monómero al binder.

Conversión para una mezcla binaria ideal

$$\varphi_p = (w_p / \rho_p) / [(w_p / \rho_p) + ((1 - w_p) / \rho_\beta)]$$
$$w_p = (\varphi_p \rho_p) / [\varphi_p \rho_p + (1 - \varphi_p) \rho_\beta]$$

ρ_p y ρ_β son las densidades reales de las fases a un estado compatible. En la conversión no se utiliza la densidad aparente del polvo suelto o la densidad del lecho de pellets. Para un sistema con agua, solvente u otros componentes deben sumarse sus volúmenes y declarar si se supone aditividad.

> El escenario económico usa **90,0 % de polvo y 10,0 % de ligante sobre la masa total**. Añadir 10 g de ligante a 100 g de polvo sería otro caso: 9,09 % de ligante sobre 110 g. Ambas dosificaciones no deben intercambiarse.

Una TGA mide un cambio de masa. Para traducirlo a composición hay que considerar humedad, volátiles, cenizas y posibles reacciones del polvo con la atmósfera. En metales, la oxidación puede compensar parte de la pérdida orgánica. Los complementos 100 - carga se identifican como cálculo, no como análisis de cada polímero.

5. Lo que cambia al pasar del bronce a las cerámicas

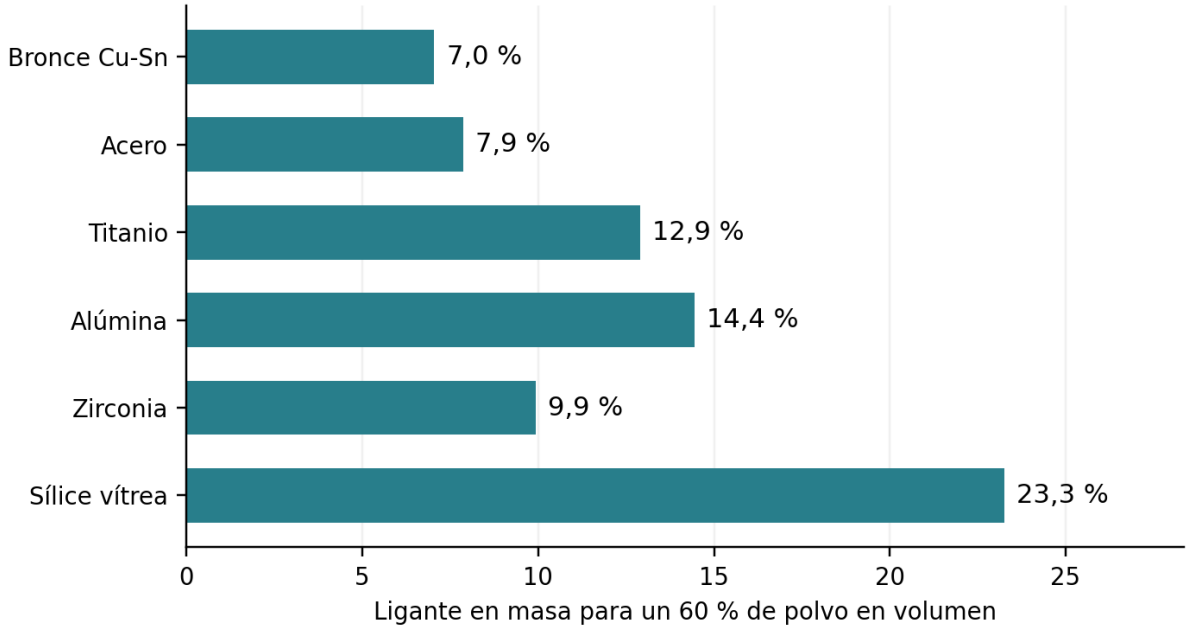

Figura 1. Cálculo ilustrativo a 60 % de polvo en volumen. Densidad del ligante supuesta: 1,00 g/cm³. No representa recetas ni densidad certificada de EB1 o EB2G.

Polvo	ρ_P supuesta (g/cm³)	Polvo vol. con 90,0 % masa	Binder masa con 60 % vol.
Bronce Cu-Sn	8,80	50,6 %	7,0 %
Bronce Cu-Al	7,60	54,2 %	8,1 %
Acero	7,80	53,6 %	7,9 %
Titanio	4,50	66,7 %	12,9 %
Alúmina	3,95	69,5 %	14,4 %
Zirconia	6,05	59,8 %	9,9 %
Sílice vítrea	2,20	80,4 %	23,3 %
WC-Co ilustrativo	14,50	38,3 %	4,4 %

Con estas hipótesis, la mezcla produce 50,6 % de polvo en volumen en Cu-Sn, 69,5 % en alúmina y 80,4 % en sílice vítrea. Trasladar una dosificación en masa puede superar la carga procesable de otro polvo. El cálculo no determina el óptimo.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

5.1. Sensibilidad a la densidad del ligante

La densidad efectiva del sistema ligante no es un detalle prescindible. El intervalo 0,90-1,40 g/cm³ es una sensibilidad hipotética; no es una ficha de EB1 o EB2G ni una medición de todos los ligantes comerciales. Se mantiene la misma fracción de polvo en masa: 90,0 %.

Material	Polvo vol. ρ_β = 0,90	Polvo vol. ρ_β = 1,00	Polvo vol. ρ_β = 1,40
Bronce Cu-Sn	47,9 %	50,6 %	58,9 %
Bronce Cu-Al	51,6 %	54,2 %	62,4 %
Acero	50,9 %	53,6 %	61,8 %
Titanio	64,3 %	66,7 %	73,7 %
Alúmina	67,2 %	69,5 %	76,1 %
Zirconia	57,2 %	59,8 %	67,6 %
Sílice vítrea	78,6 %	80,4 %	85,1 %
WC-Co ilustrativo	35,8 %	38,3 %	46,5 %

El cambio de densidad modifica el valor convertido, pero no elimina las diferencias entre materiales. Las mezclas de igual porcentaje en masa siguen sin ser equivalentes en volumen. La densidad de un sistema POM no debe sustituirse por 1 g/cm³ sin justificarlo.

El archivo sensibilidad_densidad.csv incluye también la fracción de ligante en masa necesaria para alcanzar 60 % vol. de polvo. La banda es un análisis de hipótesis, no un intervalo de confianza ni una ventana de formulación cualificada.

Antes de formular: medir o documentar la densidad de cada fase en un estado compatible, la homogeneidad, la reología y la carga crítica. Una conversión aritmética correcta no demuestra que la mezcla se pueda inyectar, desmoldear o sinterizar sin defectos.

6. Cargas publicadas: metales y referencias históricas

Sistema / fuente	Polvo reportado	Ligante o fracción restante	Límite de uso
Catamold 316L-A [24]	≈90 % masa; ≈63 % vol.	≈10 % masa; ≈37 % vol., por complemento.	Estudio de 2016. No ficha de lote actual.
Catamold TZP-A, zirconia [24]	≈80 % masa; ≈47 % vol.	≈20 % masa; ≈53 % vol., por complemento.	Grado cerámico histórico; oferta actual no comprobada.
PolyMIM 316L D 110 E y 17-4PH D 110 E [25]	>60 % vol.	<40 % vol. no metálico.	No proporciona receta exacta ni una carga para toda la gama.
Catamold 316 L G y 17-4PH G [25]	>60 % vol.	<40 % vol. no metálico.	Comparación reológica específica de esos materiales.
ADVAMET, guía térmica [7]	No deducido.	6,0-8,3 % de binder; base no explícita en el texto.	Confirmar wt%, grado y estado seco antes de normalizar.
316L + LDPE/parafina [30]	70 % vol.	30 % vol. restante.	Mezcla experimental; polvo medio de 50 µm; evaluación sin sinterizado.

Los pares de Catamold [24] implican densidades del ligante de 1,495 y 1,341 g/cm³, usando 7,9 g/cm³ para 316L y 6,05 g/cm³ para zirconia. Es una comprobación de coherencia interna mediante $\rho_\beta = \rho_p \varphi_p (1 - w_p) / [w_p (1 - \varphi_p)]$, no una medición independiente ni reconstrucción de la receta.

La comparación de 2019 identifica distribuciones de partícula distintas entre los feedstocks metálicos estudiados. El tamaño de 1-10 µm no constituye una condición universal de todos los procesos. Tampoco inyectar un polvo más grueso demuestra equivalencia final [25,30,43]. MPIF describe polvos típicamente inferiores a 20 µm, sin establecer una exigencia universal de 1-10 µm [45].

ND significa que no se localizó un valor utilizable, no que se haya demostrado ausencia de información del fabricante. La tabla de cargas ampliada se entrega en CSV con estatus, localizador y precaución por fila.

7. Cargas publicadas: cerámicas y suspensiones

Sistema / fuente	Dato de polvo	Complemento o extracción	Alcance
INMAFEED K1008 [26]	84,5 % masa, TGA.	15,5 % masa no cerámica.	Muestra de 2017.
INMAFEED K1010 [26]	85,3 % masa, TGA.	14,7 % masa no cerámica.	Muestra de 2017; no valor contractual actual.
INMAFEED K1013 [26]	84,1 % masa, TGA.	15,9 % masa no cerámica.	No identifica composición de cada orgánico.
INMAFEED K1009, zirconia [27]	84 % masa, TGA.	16 % masa no cerámica.	Estudio por extrusión publicado en 2026.
K1010 y K3012 en Didilis [28]	80-85 % masa; 50-60 % vol.	15-20 % masa; 40-50 % vol.	Rangos reportados; no emparejar arbitrariamente extremos.
Alúmina + K83/K83G 1:1 [26]	85 % masa nominal.	15 % masa de ligante nominal.	Feedstock preparado por autores con binders comerciales.
Nueva alúmina LithaLox [20]	55 % vol. declarado.	45 % vol. no cerámico.	Anuncio 2026; no generalizar a zirconia.
INMAPOM K3030 [37-38]	No deducido.	15,8 % DE 2017 / 16,6 % EN 2024 de pérdida catalítica.	Revisiones diferentes; no atribuir la diferencia sólo al idioma.

En K3030, la ficha DE recuperada está fechada en noviembre de 2017; la EN, en julio de 2024. Sus pérdidas catalíticas son 15,8 % y 16,6 %, respectivamente. No se promedian ni se infiere un cambio de receta. Ambas indican contracción aproximada de 16,6 % y factor de molde 1,20; el carácter lineal se interpreta a partir de ese factor (1 - 1/1,20 ≈ 16,7 %), no de una etiqueta literal [37-38].

Didilis denomina K3012 “INMAFEED” y describe un ligante POM; el programa del fabricante lo sitúa en INMAPOM. Se conserva la denominación del artículo al citar sus resultados y la del proveedor al identificar el producto. No se fusionan ambas fuentes como un certificado [28,36]. Como coherencia aritmética, alúmina a 80-85 % masa con $\rho_p = 3{,}95$ y $\rho_\beta = 1$ g/cm³ da aproximadamente 50,3-58,9 % vol.; ello no asigna extremos emparejados a sus dos grados.

8. Panorama comercial: sistemas metálicos

Proveedor / familia	Formato y ruta	Dato disponible	Relevancia para molde impreso
BASF / Catamold	Granza MIM; Catalítica + residual térmico	ND por grado actual	Producto comercial; ensayar molde y ruta por grado [2,3,24,25]
polyMIM / polyMIM	Feedstock listo para moldear; Agua + residual térmico	>60 % vol en cuatro compuestos del estudio de 2019, dos de polyMIM	No extender a todo el catálogo ni a todos los lotes [4,25]
polyMIM / polyPOM	Feedstock listo para moldear; Catalítica; ciclo y retirada del residuo según grado	ND	No confundir con polyMIM acuoso [5]
AMP / ADVAMET	Feedstock MIM; Térmica; confirmar alternativas por grado	6,0-8,3 % binder en ejemplo; base no explícita	Ciclo publicado para piezas pequeñas bien soportadas [6,7]
AMP / ADVACAT	Feedstock MIM; Catalítica; ciclo y retirada del residuo según grado	ND	Formulación distinta de ADVAMET [6]
Micro MIM Japan / Taisei Kogyo / MMJ-316L-070 / MMJ-17-4PH-070	Pellets MIM; Térmica sin extracción adicional declarada	ND; no digitización de TG para inventar receta	Ficha distingue valores indicativos de garantías [12,13]

Qué comparar dentro de una misma aleación

Para aislar el efecto del utillaje conviene utilizar el mismo feedstock y lote en un molde metálico de referencia y en el molde impreso. Para comparar proveedores, deben fijarse composición final, geometría, acabado y requisito funcional. De lo contrario, una diferencia atribuida al ligante puede proceder del polvo, el tratamiento térmico o los criterios de aceptación.

Catamold ofrece actualmente varios aceros en su cartera pública, incluidos 316L, 17-4PH y otras familias [2]. Ello no acredita suministro de bronce Cu-Sn o bronce de aluminio. Para estos dos casos, la disponibilidad de una mezcla comercial lista para inyectar permanece como dato a confirmar; no se utiliza el precio de un acero como sustituto.

La ruta exclusivamente térmica es una opción comercial real, como declara Micro MIM Japan [12]. Eliminar el baño de extracción del binder puede simplificar equipos, pero no elimina la necesidad de retirar un molde sacrificable ni los tiempos de calentamiento, soporte y evacuación de productos de descomposición.

9. Panorama comercial: sistemas cerámicos

Proveedor / familia	Ruta declarada	Carga localizada	Lectura técnica
INMATEC / INMAFEED	Agua + térmica	Ejemplos históricos medidos: 84,0-85,3 % masa polvo	Identificar grado, año y lote; no un valor universal [8,9,26,27]
INMATEC / INMAFLOW	Acetona + térmica	ND en programa consultado	Evaluar efectos del disolvente sobre molde y pieza [10]
INMATEC / INMAPOM	Catalítica en una etapa declarada; verificar residuo	K3030: 15,8 % DE 2017 / 16,6 % EN 2024 de pérdida de masa	No equivale a receta completa; son revisiones diferentes [36,37,38]
KRAHN Ceramics / Embemould / kcmix	Agua, acetona, térmica o catalítica según sistema	ND genérico; mezcla de investigación identificada aparte	Acordar composición procesable y ruta con proveedor [11,26]
CERMET Feedstock / Gamas CIM y MIM a medida	Diversas, declaradas por proveedor	ND	Cobertura comercial declarada; faltan fichas específicas comparables [14]

La ficha K1010 describe extracción en agua seguida de eliminación térmica. El programa INMAFLOW especifica acetona y etapa térmica. INMAPOM declara extracción catalítica en una etapa; se respeta esa descripción y se exige verificar el residuo, sin inventar una segunda operación separada para todos sus grados [9-10,36-37].

La disponibilidad de varias rutas dentro de un fabricante permite plantear ensayos controlados, pero los grados no deben considerarse idénticos salvo el binder: también pueden cambiar polvo, aditivos, carga y curva de sinterizado. Una comparación causal requiere conocer esas diferencias.

INMATEC recomienda componentes resistentes a la abrasión en sus fichas K1010 y K3030, incluido el molde. Por tanto, la ficha no constituye una aprobación de un molde fotopolimérico duradero. Su empleo experimental exige medir desgaste, deriva dimensional y contaminación; un sacrificable evita acumular ciclos, pero no el desgaste durante el llenado [9,37].

10. EB1, EB2G y las suspensiones de impresión directa

Sistema	Qué se compra	Carga y ruta	Papel en el estudio
3Dresyn EB1 [15]	Ligante sin polvo.	Hasta 60 % vol. de polvo declarado; extracción parcial acuosa y térmica.	Formulación propia; no granza lista para moldear.
3Dresyn EB2G [16]	Ligante para vidrio y sílice.	Sin porcentaje único localizado; parte acuosa y parte térmica.	Caso específico de vidrio; no asumir uso equivalente en todos los metales.
Lithoz [19-20]	Suspensiones para impresión cerámica directa.	Carga y ciclo según grado; dato de alúmina identificado en sección 7.	Comparador de ruta frente a molde impreso + inyección.
3DCeram [21]	Suspensiones fotopolimerizables, incluida CERA-Alumina.	Carga no localizada en la ficha pública consultada.	Plataforma abierta; requiere cualificar impresión y ciclo final.
Glassomer [22-23]	Compuestos sólidos para inyección; líquidos para impresión/colada.	No se localizó carga exacta por producto.	Separar servicio, resina líquida y posible suministro de granulado.

Las páginas de EB1 y EB2G indican mezclado a 160 °C y extracción acuosa a 65 °C como condiciones de referencia. No publican en lo consultado la densidad efectiva necesaria para convertir cada formulación, el reparto soluble/insoluble ni una receta universal en masa. Esos datos deben medirse o documentarse antes de afirmar equivalencia con una granza comercial [15-16].

La denominación pública localizada para el segundo ligante es **EB2G**. Se utiliza esa identificación en el informe. La cifra 10 % de binder queda restringida al escenario previo 90/10 y no se convierte en una recomendación general de EB1 o EB2G.

La impresión directa tampoco debe reducirse a “todo el binder se elimina térmicamente”: existen formulaciones investigadas que incorporan extracción acuosa parcial. Eso no permite atribuir ese mecanismo a todas las suspensiones comerciales [32].

10.1. Feedstocks de 3Dresyns con polvo y a medida

La oferta también incluye feedstocks que ya contienen polvo y un servicio de formulación a medida [48-51]. Son categorías distintas de EB1/EB2G sin polvo y de las suspensiones fotopolimerizables para impresión directa.

Oferta	Material y ruta documentados	Carga y límite de comparación
CS YSZ1 [49]	YSZ con 3 % molar de Y2O3 y ligante basado en EB1. Sólido a temperatura ambiente; inyección en caliente, extracción acuosa y térmica y posterior sinterizado.	Carga exacta de polvo y fracción extraíble del ligante: ND. Ruta declarada por el proveedor.
MS Ti1 [50]	Titanio con ligante basado en EB1. Sólido a temperatura ambiente; inyección en caliente, extracción acuosa y etapa térmica con argón.	Carga exacta de polvo y fracción extraíble del ligante: ND. No inferir propiedades finales.
Slurries cerámicos y metálicos a medida [51]	Servicio declarado de formulación y suministro. Ejemplos: alúmina, zirconia/YSZ, SiC/SiSiC, Si3N4, hidroxiapatita, 316L, Ti, W-Mo y Co-Cr.	Definir polvo, carga, ligante y especificación de proceso para cada proyecto; las familias enumeradas no son grados intercambiables.

El servicio de formulación a medida admite proyectos para **cualquier polvo especificado por el cliente**, sujetos a evaluación de compatibilidad y cualificación del proceso previsto. Este alcance del servicio fue declarado por el autor el 8 de noviembre de 2026; los materiales enumerados son ejemplos. La retirada del molde, la extracción del ligante y, cuando corresponda, el sinterizado deben definirse para cada formulación.

El proveedor declara dispersiones cerámicas hasta 65 % en volumen y suministro a medida, incluido en cartuchos [51]. Es una capacidad genérica de formulación, no la carga medida de CS YSZ1, MS Ti1 ni de todos los productos personalizados.

Qué cambia en la comparación

Comprar un slurry formulado traslada al proveedor la incorporación del polvo y el trabajo de formulación; comprar EB1 deja esas tareas al usuario. Debe compararse el coste del feedstock entregado por kilogramo de polvo contenido y, finalmente, por pieza aceptada. El escenario de bronce 90/10 y la hipótesis de 40 EUR/kg de ligante no son recetas ni precios de estos feedstocks completos.

En un suministro a medida deben acordarse grado, distribución granulométrica, carga en masa y volumen, reología, extracción, química residual, contracción y criterios de aceptación. Deben aplicarse los mismos criterios de cualificación que a otros proveedores de feedstocks a medida.

Las descripciones públicas identifican feedstocks de procesado en caliente: slurry no implica un líquido acuoso a temperatura ambiente. Las declaraciones de densidad, reducción de defectos o idoneidad mantienen su carácter comercial mientras no estén respaldadas por un ensayo definido y una especificación final comparable.

11. Comparación entre vías de extracción

Ruta	Ventaja potencial	Penalización o límite	Dato necesario
Agua + térmica	Retirar una fracción soluble antes del calentamiento y abrir poros.	Hinchamiento, debilitamiento, secado, gestión del baño y reacción del polvo.	Fracción extraíble, resistencia húmeda, tiempo hasta el núcleo y residuos.
Disolvente + térmica	Selectividad para ceras u otros componentes, si el sistema está diseñado para ello.	Ataque al molde o al backbone; recuperación de solvente, secado y equipos.	Compatibilidad, solubilidad, concentración del baño y residuo del ligante.
Catalítica	Despolimerización de sistemas adecuados, como POM; posibilidad de integración industrial.	Equipo, tratamiento de gases y compatibilidad química; no sustituible por simple agua.	Grado exacto, pérdida de masa objetivo y residual. Una o varias etapas según ficha.
Térmica directa	Evita una extracción líquida adicional del binder.	Mayor carga orgánica inicial; gradientes, presión interna de gases, soporte y ciclo.	TGA/DSC, gases, espesor crítico, atmósfera y carga real del horno.
Térmica con absorción capilar	Un soporte poroso puede retirar componentes fundidos de sistemas adecuados.	Contacto, limpieza, contaminación y soporte geométrico.	Compatibilidad del lecho y evolución de forma; no confundir con evaporación pura.

La ruta con agua puede reducir el uso de disolventes orgánicos, pero eso no prueba por sí solo un menor impacto ambiental total. Deben contabilizarse calentamiento, consumo de agua, secado, emisiones, tratamiento de residuos y piezas rechazadas. La misma cautela se aplica a cualquier afirmación de ahorro energético por usar una impresora económica.

La escala dimensional de la ecuación de difusión, con difusividad constante, es $t \propto L^2/D$. Sólo bajo ese supuesto el tiempo característico crece con el cuadrado de la distancia de extracción. Es una orientación de diseño, no una ley universal del debinding: hinchamiento, reacción, porosidad cambiante y retirada por frentes pueden modificar esa dependencia. Espesor y accesibilidad importan más que masa o área de plataforma por sí solos.

Base documental comercial: [4-13,15-16,36-38]. Enneti [42] revisa la retirada térmica y la formación de defectos; su resumen no valida un ciclo concreto. Los manuales [39-41] se identifican como antecedentes generales, con acceso limitado declarado.

12. Retirar el molde y extraer el binder son operaciones distintas

La secuencia debe especificar qué se retira, con qué medio y qué sostiene a la pieza en cada momento. Que dos materiales sean solubles en agua no garantiza una retirada conjunta estable. Un molde puede hincharse mientras la pieza pierde ligante y capacidad de soportar tensiones.

Arquitectura	Ventaja	Limitación decisiva
Molde metálico reutilizable	Referencia estable para inyección repetida, transferencia de calor y comparación.	Coste inicial y restricciones de desmoldeo; núcleo soluble si la topología lo exige.
Molde fotopolimérico duradero	Fabricación rápida de insertos y reparto del coste sobre varios ciclos.	Desgaste, fluencia, fatiga térmica, desmoldeo y deriva dimensional medidos.
Molde sacrificable acuoso	Geometrías que no permiten extracción mecánica; retirada sin apertura convencional.	Pérdida de soporte, hinchamiento, tiempos de lavado y compatibilidad del polvo.
Molde sacrificable con disolvente	Permite buscar un medio de retirada distinto del binder.	Selectividad real; solvente retenido, ataque a orgánicos y limpieza de cavidades.
Molde híbrido: soporte metálico e inserto/núcleo impreso	Reduce el volumen de resina y aporta soporte durante el llenado.	Diseño de interfaces, sellado, contracción diferencial y acceso al medio de retirada.

Basso y colaboradores describen retirada alcalina del molde y posterior extracción del binder con n-heptano: el medio que retira el molde no tiene por qué ser el que extrae el ligante [29]. Es un antecedente útil para diseñar selectividad, sin extrapolar su resultado a cualquier resina soluble.

La alternativa de eliminar molde y ligante únicamente por calentamiento añade la masa orgánica del molde al ciclo. Deben evaluar expansión, evacuación de gases, contacto y contaminación. Un material calcinable para microfusión no queda automáticamente cualificado para permanecer en contacto con una pieza verde durante debinding.

13. Matriz de compatibilidad que debe resolverse

Todas las celdas siguientes son condiciones de evaluación, no aprobaciones de uso. La compatibilidad depende del grado, geometría, estado de curado, presión, temperatura y medio de retirada.

Feedstock	Molde duradero	Sacrificable acuoso	Sacrificable con disolvente
Acuosa + térmica	Condicionada por llenado, desgaste y desmoldeo	Puede coincidir extracción del molde y binder: validar pérdida de soporte	Comprobar ataque al backbone; preferir secuencia selectiva
Disolvente + térmica	El molde se retira antes del baño, salvo núcleo residual	Potencial retirada selectiva del molde si el feedstock resiste el agua	Riesgo de extracción simultánea o hinchamiento: validar selectividad
Catalítica POM; acabado según grado	Referencia industrial de partida; validar molde polimérico	Retirar molde antes del catalítico puede separar operaciones	Confirmar resistencia y limpieza antes del reactor catalítico
Térmica directa	Sin baño de binder; verificar soporte durante calentamiento	El baño aún puede afectar polvo, aditivos y resistencia verde	La ausencia de disolvente en debinding no acredita estabilidad del feedstock en él
Suspensión fotopolimerizable	Sólo si existe un mecanismo de curado dentro del molde	No basta inyectar y enfriar; requiere curado y compatibilidad	No equivalente a granza MIM/CIM termoplástica
Suspensión acuosa para colada/gel	Molde no poroso exige mecanismo de consolidación apropiado	El agua de la suspensión puede atacar un molde hidrosoluble desde el llenado	Posible alternativa si químicamente compatible y consolida

En las suspensiones fotopolimerizables se añade una condición previa: el interior debe consolidar. La exposición del exterior de un molde opaco no acredita curado uniforme de su contenido. En una suspensión acuosa, el molde hidrosoluble puede ser incompatible desde el contacto inicial, aunque fuera útil en otra ruta de inyección caliente.

La ficha de una resina duradera o sacrificable describe un material, no certifica todas las celdas de esta matriz. El precio bajo del equipo tampoco decide la compatibilidad: la condición verificable es la estabilidad y reproducibilidad del molde fabricado con ese equipo.

14. Metales: prioridades y límites de transferencia

Familia	Interés para ampliar el estudio	Riesgo o variable de calidad que priorizar	Comparador
316L y 17-4PH	Base de partida con varias familias comerciales de binder.	Composición final, poros, carbono residual, tratamiento térmico y resistencia; no intercambiar ambos aceros.	Mismo feedstock en molde metálico.
Cu y Cu-Sn	Continuidad con el análisis económico previo; potencial de formas internas.	Oxígeno, porosidad, contracción, composición real y estanqueidad si la función lo requiere.	Fundición o mecanizado de la misma aleación y especificación.
Cu-Al / Cu-Al-Ni-Fe	Extensión de interés técnico, pero no equivale a Cu-Sn ni a cobre puro.	Control superficial del polvo, fases, atmósfera y comportamiento frente a corrosión y erosión.	Aleación de fundición realmente sustituida.
Ti y aleaciones	Caso de alto valor por geometría y reducción de mecanizado.	Control de intersticiales y contaminación en toda la cadena; hornos y manipulación específicos.	Ruta cualificada del mismo material, no bronce.
WC-Co y metales densos	Demuestran que baja fracción de binder en masa puede seguir siendo alta en volumen.	Balance químico, fases, abrasividad y desgaste; no aplicar ciclo de acero.	Material convencional equivalente y acabado requerido.

Se propone comenzar por una pareja comercial de acero y por alúmina para separar el problema de utillaje del desarrollo de una aleación difícil. Cu-Sn se mantiene como caso económico y de formulación propia; Cu-Al requiere una verificación metalúrgica adicional antes de asignarle rendimiento de producción.

La cartera de AMP incluye diversas aleaciones y materiales en sus fichas [6-7]; esto justifica explorar familias adicionales, pero no sustituye la ficha del grado elegido. Las variables de la tabla son una propuesta de control técnico, no resultados comparativos ya obtenidos.

Las masas de 0,5, 2 y 10 kg del escenario económico son extrapolaciones sin validación de fabricabilidad, extracción ni sinterización. La masa, el espesor de transporte y la geometría deben evaluarse por separado; el área de impresión no cualifica la pieza.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

15. Cerámicas y vidrio: ampliar sin mezclar funciones

Familia	Uso en la comparación	Control dominante propuesto
Alúmina	Primera referencia CIM; varias rutas comerciales y medidas de carga.	Densidad relativa, defectos, dispersión de resistencia, rugosidad y desgaste del molde.
Zirconia	Segundo caso estructural; contraste de densidad y sistema ligante.	Fases, contracción, distorsión, defectos y resistencia según estado final.
Sílice vítrea	Caso para EB2G y comparación con soluciones de vidrio.	Pureza, burbujas, transmisión y rugosidad óptica si aplican; densidad no sustituye transparencia.
AlN	Caso de frontera para rutas acuosas.	Reactividad del polvo con agua, tratamiento superficial, residuos y propiedades térmicas.
Si_3N_4 / SiAlON y otros no óxidos	Extensión posterior a una ruta de base ya estabilizada.	Identidad química exacta, aditivos y atmósfera; no usar el ciclo de alúmina por analogía.
$BaTiO_3$ y BNT-BT	Ejemplos funcionales documentados en moldes impresos.	Fase, densidad, defectos y respuesta funcional; no basta medir resistencia o porosidad.

Oliveira y colaboradores muestran que la protección frente a hidrólisis y la dispersión de AlN dependen de su tratamiento superficial. Por tanto, “agua” no es una vía universalmente inocua para cualquier polvo. El resultado tampoco exige excluir todo AlN: exige especificar el grado y validar el medio [33].

Didilis estudia zirconia, alúmina y dos cerámicas piezoeléctricas, con dificultades de disolución y defectos dependientes de geometría y flujo. Es un antecedente directo de ampliación multicerámica, por lo que esa ampliación, por sí sola, no constituye una primicia [28].

La referencia comercial de vidrio diferencia compuestos sólidos y líquidos [22-23]. Una receta de polvo y binder para inyección no acredita automáticamente calidad óptica. Tampoco las propiedades de una suspensión LCM se atribuyen al molde impreso: son rutas de fabricación distintas [19].

16. Calidad: qué debe conservarse al cambiar de proceso

Criterio	Posible beneficio	Posible desventaja	Medida de decisión
Geometría	Cavidades complejas y menor número de componentes.	Llenado incompleto, uniones de flujo, alabeo y amplificación de errores del molde.	Dimensiones por etapa y desviación frente a CAD y control.
Superficie	Replicación de detalles y menor sobremetal.	Escalones de impresión, exposición desigual, desgaste o marcas de compuerta.	Ra/Sa en zonas definidas y sobremecanizado necesario.
Defectos internos	Proceso reproducible si mezcla y flujo están controlados.	Segregación, poros, delaminación o grietas durante retirada y calentamiento.	Secciones o tomografía con resolución declarada.
Estado final	Posibilidad de composición y microestructura ajustadas.	Residuos, contaminación, oxidación o fase no deseada.	Química y fases; densidad con poros abiertos/cerrados.
Mecánica	Prestaciones ajustables mediante material y ciclo.	Fragilidad, dispersión o anisotropía no detectada por densidad.	Resistencia, deformación y tenacidad según función; no tratarlas como sinónimos.
Función y duración	Integración de canales y funciones.	Fugas, corrosión, erosión, fatiga o pérdida de propiedades funcionales.	Ensayo del requisito de servicio, además de probetas.

Se propone comparar dos preguntas: primero, mismo feedstock en distinto molde; después, procesos optimizados para la misma especificación final. La primera ayuda a atribuir causas. La segunda es la pertinente para compra y sustitución industrial. Densidad y microestructura deben medirse cuando ayuden a explicar el resultado; igualarlas desde el diseño cambia la pregunta si son consecuencias del proceso que se quiere comparar.

No se considera equivalencia la ausencia de una diferencia estadísticamente significativa. Deben fijarse límites de aceptación, incertidumbre de medida y tamaños muestrales según el riesgo y la variabilidad. Una impresión correcta del molde no demuestra que la pieza final cumpla esos límites.

17. Impresoras económicas: criterio de cualificación

SLA, DLP y LCD pueden producir moldes útiles. El estudio evalúa el proceso conseguido, sin deducir su calidad del precio de compra. Las superficies de 30 × 16 cm, 33 × 18,5 cm y 52,7 × 29,6 cm se aceptan como restricciones del proyecto aportadas por el promotor; no se atribuyen aquí a modelos concretos ni a ofertas vigentes.

Variable	Por qué cambia el resultado	Comprobación propuesta
Irradiancia y espectro	Cambian curado, geometría y propiedades del molde.	Mapa de irradiancia y repetibilidad con sensor adecuado a la longitud de onda.
Temperatura y tiempo	Afectan viscosidad, curado, relajación y estabilidad dimensional.	Registrar resina, ambiente, poscurado y condición antes de inyectar.
Óptica y posición	Píxel nominal o diámetro de spot no equivalen a exactitud de una cavidad.	Patrones en centro, bordes y esquinas; piezas de distintas orientaciones.
Lavado y poscurado	Pueden modificar tamaño, superficie y resistencia, especialmente en canales.	Procedimiento fijo y comprobación de limpieza interna.
Construcción del molde	Espesor, apoyos, compuertas y marco alteran la respuesta frente a presión.	Validar molde completo con la historia real de presión y temperatura.

IM-HDT e IM-HDT-WS representan dos arquitecturas distintas: duradera y sacrificable acuosa. La ficha pública de IM-HDT-WS expresa HDT <160 °C a 0,45 MPa. Esa desigualdad no es una resistencia mínima garantizada ni una presión admisible de inyección. Debe comprobarse la respuesta del molde en su geometría y estado real [17-18].

Como estimación ideal, con 60 % de polvo en volumen y densidad final relativa de 0,98, el factor lineal de escala es (0,98/0,60)^(1/3) = 1,178. A ese sobredimensionado hay que añadir paredes, entradas y soportes. El área útil de impresión, por sí sola, no determina el tamaño final fabricable.

La estimación supone masa inorgánica conservada, contracción isotrópica y densidades compatibles; no sustituye la compensación medida en cada eje. Formlabs ofrece guías de moldes impresos, pero su uso en inyección de polímeros no cualifica automáticamente un feedstock abrasivo MIM/CIM [35].

18. Costes: normalizar antes de comparar precios

Para un feedstock comprado a precio Pf y fracción de polvo w_p, el coste ideal de material por kilogramo de polvo contenido es Pf/w_p. Para formulación propia, el coste de materias primas por kilogramo de polvo es $P_p + [(1 - w_p)/w_p]P_\beta$. Son balances antes de mermas, fabricación y control.

Concepto	Feedstock comercial	Polvo + EB1 / EB2G u otro binder
Precio comparable	EUR/kg entregado de mezcla, con grado, lote, cantidad y condiciones.	EUR/kg de polvo y ligante por separado, bajo iguales condiciones de entrega.
Preparación	Incluida parcialmente en el producto; confirmar adaptación o secado.	Mezclado, granulación, dispersión, homogeneidad y análisis por lote.
Desarrollo	Ajuste al molde, máquina y pieza; cualificación.	Además, desarrollo y estabilidad de la formulación.
Riesgo y suministro	Trazabilidad, consistencia, soporte y mínimos de compra.	Flexibilidad, control propio de calidad y aprovisionamiento de ambos componentes.

Con 90,0 % de polvo en masa y binder a 40,00 EUR/kg, el ligante aporta **4,44 EUR por kilogramo de polvo**, antes de recargos. A 60 % vol. de polvo, aporta 3,03 EUR/kg de Cu-Sn, 6,75 EUR/kg de alúmina y 12,12 EUR/kg de sílice vítrea. No es un precio de feedstock comercial.

No se ha obtenido un conjunto de ofertas actuales comparables por grado y volumen para todos los fabricantes. Por tanto, no se asignan precios ficticios a Catamold, polyMIM, INMATEC o Lithoz. Los escenarios monetarios se mantienen separados de los datos comerciales y se normalizan con el contenido inorgánico y la calidad requerida.

El coste del molde incluye resina, soportes, pérdidas, impresión, limpieza, poscurado, montaje y control. En un duradero se reparte entre ciclos útiles comprobados, no entre una vida supuesta. En un sacrificable se suma retirada y tratamiento del baño. La depreciación de la impresora puede ser pequeña frente a mano de obra, horno y rechazo.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

19. Modelo por etapas y coste de los rechazos

Sea c_i el coste incremental por pieza que entra en la etapa i, y q_i la fracción que supera esa etapa. Si no hay retrabajo ni reentrada, el coste variable por pieza aceptada es:

$C_{variable} = \Sigma_i c_i / (q_i \times q_{i+1} \times \ldots \times q_k)$
C total = C variable + F / N aceptadas
F representa desarrollo y utillaje no incluidos ya en las etapas. Los créditos de recuperación deben imputarse donde se producen, con su valor neto real.

Ejemplo ilustrativo	Rechazo temprano	Rechazo al final
Costes por entrada en cuatro etapas	10 + 20 + 30 + 5 EUR	10 + 20 + 30 + 5 EUR
Rendimientos condicionales	0,90; 1; 1; 1	1; 1; 1; 0,90
Rendimiento total	90 %	90 %
Coste por pieza aceptada	66,11 EUR	72,22 EUR

Los dos casos tienen igual rendimiento total, pero el rechazo tardío consume más recursos. Una comparación industrial debe registrar cuándo aparece el defecto y cuándo se detecta. El cociente coste total/rendimiento global solo es correcto bajo una asignación coherente de los costes que realmente soportan las piezas rechazadas.

Variables que pueden invertir la decisión

La carga útil del horno y el porcentaje aceptado pueden pesar más que un descuento adicional de resina. También pueden dominar el mecanizado evitado, el número de variantes, la cantidad de moldes por impresión y la vida del molde duradero. La subcontratación debe compararse con costes evitables: no todo coste contable de una instalación existente desaparece al cambiar de ruta.

Se contabilizan calentamiento, mantenimiento, atmósfera, consumibles, mano de obra, control y ocupación del horno; no solo electricidad. Tampoco se computa dos veces el ahorro de mecanizado si ya está incluido en la fila de acabado. Los ciclos de horno se asignan por ocupación y productividad reales, no por volumen nominal vacío.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

20. Bronce: cribado económico y límites de escala

Se utiliza un **escenario genérico con hipótesis conservadas del promotor**. La tabla numérica no se atribuye al antecedente [1]. Su punto de partida queda archivado en la versión 1.0. No son cotizaciones actuales ni resultados de fabricación. Los costes se expresan por pieza aceptada.

Masa final	Cu-Sn fundido	Cu-Sn polvo 24,16 EUR/kg	Cu-Sn polvo 60,00 EUR/kg	Cu-Al fundido / polvo 60,00 EUR/kg
0,5 kg	77,93	91,05	113,85	76,47 / 125,78
2,0 kg	159,07	225,42	316,62	153,27 / 346,68
10,0 kg	483,78	832,87	1.288,88	454,76 / 1.409,76

Costes recurrentes, sin costes fijos. Ligante: 40,00 EUR/kg; resina: 40,00 EUR/kg. Rendimiento de la ruta de polvos desde molde conforme: 85,0 %. Los precios de polvo no acreditan aptitud MIM ni oferta de feedstock.

Masa final	Umbral Cu-Sn EUR/kg polvo	Umbral Cu-Al EUR/kg polvo
0,5 kg	3,53	-17,50
2,0 kg	-1,91	-16,01
10,0 kg	-3,28	-15,06

El umbral iguala los costes recurrentes manteniendo todo lo demás fijo. Un valor negativo significa que ni un polvo gratuito igualaría la fundición en ese caso. El signo de cada fila muestra el alcance de ese resultado negativo; no es una prohibición física ni una conclusión universal.

Durofer sitúa tamaños habituales en torno a 1-100 g y admite piezas más pesadas [46]; ARC declara hasta 500 g en el directorio MPIF [47]. Los rangos habituales de los proveedores no son máximos físicos universales. Las masas de esta tabla siguen sin estar cualificadas para bronce, EB1 y molde impreso; 2 y 10 kg son extrapolaciones especialmente alejadas de la práctica habitual.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

20.1. Fronteras, consumos e hipótesis de coste

Hipótesis común	Valor
Base metálica Cu-Sn / Cu-Al	18,55 / 16,00 EUR/kg
Ligante / resina de molde	40,00 / 40,00 EUR/kg
Preparación por kg de mezcla	2,00 EUR/kg
Ciclo térmico base / factor Cu-Al	400,00 EUR / 1,5
Rendimiento de fundición	95,0 %
Molde conforme por intento de impresión	95,0 %
Pieza aceptada desde molde conforme	85,0 %
Rendimiento conjunto desde intento de impresión	80,75 %
Recargos resina / mezcla sobre cantidad nominal	10,0 % / 5,0 %
Sobremetal fundición / polvos	10,0 % / 3,0 %

El coste de obtener un molde conforme ya se divide por el rendimiento de impresión. Después se aplica el rendimiento desde ese molde hasta pieza aceptada. Son fronteras sucesivas, no dos estimaciones del mismo rendimiento global.

Los recargos multiplican el consumo nominal por (1 + recargo). No son fracciones perdidas sobre la entrada, que exigirían dividir por (1 - pérdida). Se conservan los balances originales y sus créditos de retorno; recuperación física y precio de chatarra son variables distintas.

El JSON y el diccionario identifican cada coste por pieza, impresión y horno. Los fijos se separan en dev para polvos y fixed_casting para fundición. Cero en fundición significa costes amortizados o no evitables en esta decisión, no inexistencia histórica de modelos o puesta a punto.

calculos.py permite variar las entradas económicas documentadas. El generador toma de resultados.json los importes del relato y las etiquetas. No predice capacidad de horno, rendimiento, defectos o ciclos enteros por lote. Cambiar la geometría o la arquitectura del proceso requiere revisar las hipótesis, no sólo una celda.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

21. Sensibilidad: rendimiento y ocupación del horno

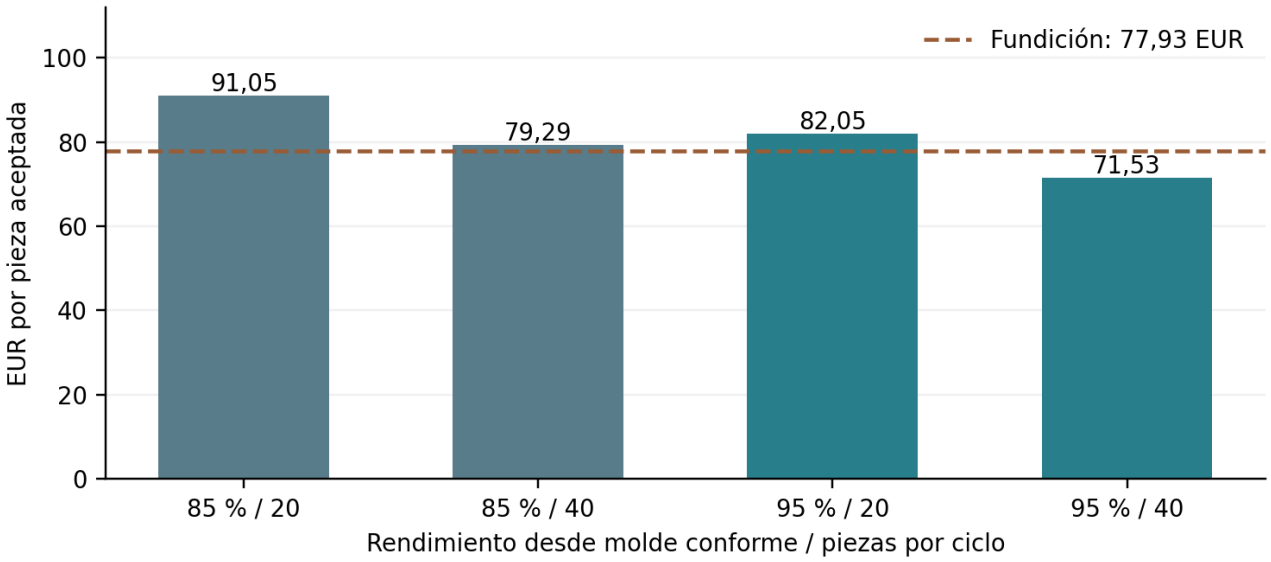

Figura 2. Caso hipotético de Cu-Sn de 0,5 kg. Polvo: 24,16 EUR/kg; ligante: 40,00; resina: 40,00 EUR/kg. Se varían rendimiento desde molde conforme y ocupación; coste base de ciclo 400,00 EUR.

El caso base de la sección 20 cuesta 91,05 EUR por polvos y 77,93 EUR por fundición. El caso de sensibilidad seleccionado, con 95,0 % de rendimiento desde molde conforme y 40 piezas por horno, cuesta 71,53 EUR por polvos; la referencia de fundición es 77,93 EUR.

La diferencia recurrente (fundición menos polvos) es 6,40 EUR/pieza. El signo positivo favorece polvos; el negativo favorece fundición. Los costes totales dependen además de los fijos de ambas alternativas.

El umbral de precio del polvo en ese caso es 35,40 EUR/kg. No es una oferta obtenida ni una previsión industrial. La ocupación y el rendimiento deben mantenerse bajo la misma calidad; duplicar la carga exige comprobar geometría, circulación de gases y uniformidad.

Para otros materiales deben introducirse grado, carga, precio entregado, ciclo, capacidad, recuperación y requisitos propios. No se trasladan a acero o cerámica el precio, la chatarra ni el factor térmico de bronce.

21.1. Costes fijos de ambas alternativas

C fundición = c fundición + F fundición / N
C polvos = c polvos + F polvos / N
Polvos no es más caro si N × (c fundición - c polvos) ≥ F polvos - F fundición.

La tabla utiliza el caso de sensibilidad seleccionado de la figura 2: 95 % de rendimiento desde molde conforme y 40 piezas por horno. Con F polvos = 9.000 EUR y F fundición = 0 EUR, los totales a N = 1.000 son 80,53 EUR/pieza por polvos y 77,93 EUR/pieza por fundición.

F fundición	Fundición total EUR/pieza	Polvos total EUR/pieza	Condición de coste de polvos
0 EUR	77,93	80,53	Desde 1.407 piezas
3.000 EUR	80,93	80,53	Desde 938 piezas
9.000 EUR	86,93	80,53	Todos los N positivos

Los fijos de la tabla son hipótesis, no presupuestos. Con los fijos configurados, polvos no es más caro: desde 1.407 piezas. El fijo de fundición que igualaría ambas rutas a N = 1.000 es 2.601,00 EUR. Si ese resultado fuera negativo, polvos ya sería más barato a ese N aunque la fundición no tuviera costes fijos.

En el caso base de la sección 20, con 85 % de rendimiento desde molde conforme y 20 piezas por horno, polvos cuesta 13,13 EUR/pieza más en costes recurrentes. No existe recuperación a gran volumen. Para igualar los costes a N = 1.000, la fundición necesitaría 22.125,94 EUR de costes fijos propios.

Con ahorro recurrente positivo y mayor fijo de polvos, el umbral entero es el redondeo hacia arriba de (F polvos - F fundición)/(c fundición - c polvos). Sin ese ahorro no hay recuperación a gran volumen; puede haber ventaja en lotes pequeños si los fijos de polvos son menores.

El modelo usa ocupación media, sin ciclos enteros por lote, y mantiene constantes rendimiento, capacidad y calidad. Los fijos deben ser evitables en la decisión; una inversión amortizada no debe cargarse de nuevo para cambiar el signo de la comparación.

© 2026 Juan Segurola · Estudio 1 · ES · 8 de noviembre de 2026

22. Programa de evaluación propuesto

Etapa	Diseño	Resultado que debe dejar
1. Identificar materiales	Seleccionar grado y lote; registrar polvo, carga, binder, extracción y ficha.	Ficha comparable y precio entregado, o ND explícito.
2. Cualificar formulación	TGA/DSC, densidad, homogeneidad y reología en la ventana de trabajo.	Carga procesable y estabilidad; no solo porcentaje máximo.
3. Cualificar molde	Mismo CAD, lavado y poscurado; medir antes y después del llenado.	Ventana de presión-temperatura-tiempo y vida útil si es duradero.
4. Resolver retirada	Cupones de molde, pieza verde y conjunto; medios y tiempos definidos.	Selectividad, integridad y residuo con identificación de cada pérdida.
5. Verificar pieza final	Lotes independientes, posiciones del horno registradas y acabado equivalente.	Dimensión, defectos, química y requisito funcional.
6. Medir economía	Tiempo real, consumos, ocupación y rechazo detectado por etapa.	Coste por pieza aceptada y sensibilidad de la decisión.

Primera matriz recomendada: una alúmina comercial con ruta acuosa, una alúmina con ruta de disolvente o catalítica y un 316L comercial. En cada caso, comparar un molde de referencia con el impreso duradero y, cuando la topología lo justifique, con el sacrificable. No comenzar por una pieza grande y compleja que mezcle incertidumbres de formulación, molde y sinterizado.

EB1 se incorpora como formulación propia identificada con un polvo elegido, sin presumir la misma carga que la granza comercial. EB2G se incorpora en un caso separado de sílice o vidrio. Para comparar ligantes, debe fijarse el polvo; para comparar rutas optimizadas, debe fijarse la especificación final. Son objetivos experimentales diferentes.

No se prescribe un número universal de probetas. Primero se estima variabilidad entre lotes y piezas; después se dimensiona la comparación para la diferencia o margen de equivalencia relevante. El protocolo acuoso detallado ya desarrollado en [1] puede reutilizarse, evitando duplicarlo como nueva contribución.

23. Datos que faltan y alcance de las conclusiones

Ficha mínima para una oferta y una muestra comparables

Solicitar: grado y revisión; polvo y composición; d10/d50/d90, morfología y superficie específica cuando proceda; carga en peso y volumen; densidades de conversión; vehículo y fracción extraíble; base de masa y residuo esperado; reología; condiciones de inyección; ciclo de extracción y sinterizado; vida de almacenamiento; reprocesado permitido; trazabilidad; mínimos de compra y precio entregado por escalas. No se ha enviado ninguna solicitud en esta revisión.

Para moldes: versión de resina, impresora y longitud de onda, calibración, orientación, espesor, soporte, lavado, poscurado, presión en cavidad, temperatura, tiempo de contacto, medio de retirada y vida útil. Estos datos son necesarios para comparar una impresora económica con otra de mayor coste de forma verificable.

Contribución y trabajo futuro

Revisión documental crítica y marco comparativo. El estudio vincula datos comerciales heterogéneos con compatibilidad de utillaje, calidad y economía reproducible. La evidencia no establece una superioridad universal de los moldes de una marca, de EB1/EB2G o de una vía de extracción.

Las conclusiones están delimitadas por las restricciones de acceso a las fuentes y de suministro declaradas. El trabajo experimental futuro debe medir ventanas de compatibilidad y cuantificar cómo el rechazo real y la calidad final de las piezas modifican la comparación de costes.

Declaración de interés

Juan Segurola está vinculado a 3Dresyns. Sus materiales se incluyen por su relación con el utillaje y la formulación, utilizando la misma separación entre declaración comercial, medida independiente e hipótesis aplicada a los demás proveedores.

Los archivos complementarios contienen registros de fuentes, datos y cálculos reproducibles. Las conclusiones se limitan al corpus y a los supuestos declarados. © 2026 Juan Segurola. Todos los derechos reservados sobre el contenido original; los derechos de las fuentes citadas pertenecen a sus respectivos titulares.

Referencias y alcance de consulta

Las referencias comerciales identifican declaraciones del proveedor. Las científicas se utilizan dentro del protocolo y material estudiados. “Accesible” no significa reproducción íntegra en este informe. Se entregan localizadores y niveles de acceso en datos/fuentes.csv.

[1] Segurola, J. (2026). Moldes sacrificables fotopolimerizados para la fabricación indirecta de cerámicas y metales. Versión 1 ES.
Acceso: PDF íntegro aportado por el autor, 15 páginas.

[2] BASF (s. f.). Catamold: Product portfolio. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[3] BASF (s. f.). Catamold: MIM Process. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[4] polyMIM GmbH (s. f.). polyMIM product line. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[5] polyMIM GmbH (s. f.). polyPOM product line. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[6] Advanced Metalworking Practices (s. f.). Feedstock materials and services. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[7] Advanced Metalworking Practices (s. f.). Resources: Molding and Debinding Guidelines. Fuente.
Acceso: Guía oficial.

[8] INMATEC (2021). Ceramic Feedstocks: INMAFEED, INMAFLOW, INMAPOM. Fuente.
Acceso: Catálogo oficial PDF, texto accesible.

[9] INMATEC (2020). INMAFEED K1010 Technical Datasheet. Fuente.
Acceso: Ficha oficial PDF íntegra, 2 páginas.

[10] INMATEC (s. f.). INMAFLOW: Ceramic Feedstocks, Product programme. Fuente.
Acceso: Ficha oficial PDF íntegra, 1 página.

[11] KRAHN Ceramics (s. f.). The Process; Binder systems; Feedstock production. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[12] Micro MIM Japan / Taisei Kogyo (s. f.). µ-MIM feedstock sale. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[13] Micro MIM Japan / Taisei Kogyo (s. f.). MMJ-17-4PH-070. Specification sheet. Fuente.
Acceso: Ficha oficial PDF, 1 página.

[14] CERMET Feedstock Technology (s. f.). About CERMET Feedstock Technology. Fuente.
Acceso: Página oficial; folleto PDF no recuperado.

[15] 3Dresyns (s. f.). 3Dresyn EB1, Eco Binder for water debinding and sintering of Ceramic, Metal & Polymer powder slurries. Fuente.
Acceso: Ficha web oficial.

[16] 3Dresyns (s. f.). 3Dresyn EB2G, Eco Binder for water debinding and sintering of glass powder slurries. Fuente.
Acceso: Ficha web oficial.

[17] 3Dresyns (s. f.). 3Dresyn IM-HDT, durable, High Deflection Temperature for injection at high temperature. Fuente.
Acceso: Ficha web oficial.

[18] 3Dresyns (s. f.). 3Dresyn IM-HDT-WS, High-Temperature Water-Soluble Sacrificial Resin. Fuente.
Acceso: Ficha web oficial.

[19] Lithoz (s. f.). Material Overview, LCM Technology. Fuente.
Acceso: Catálogo oficial PDF, texto accesible.

[20] Lithoz (2026). Lithoz at ceramitec 2026: Premiere of Three Material Upgrades for Serial Production. Fuente.
Acceso: Comunicado oficial.

[21] 3DCeram (s. f.). CERA-Alumina: Ready-to-Print Ceramic Suspensions. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[22] Glassomer (s. f.). Technology; Glass Injection Molding. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[23] Glassomer (s. f.). Glass 3D Printing. Fuente.
Acceso: Página oficial.

[24] Islam, A.; Giannekas, N.; Marhöfer, D. M.; Tosello, G.; Hansen, H. N. (2016). Experimental Investigation of Comparative Process Capabilities of Metal and Ceramic Injection Molding for Precision Applications. DOI: 10.1115/1.4033820. Fuente.
Acceso: Manuscrito aceptado accesible, tabla 2.

[25] Sanétrník, D.; Hausnerová, B.; Pata, V. (2019). Online Rheometry Investigation of Flow/Slip Behavior of Powder Injection Molding Feedstocks. DOI: 10.3390/polym11030432. Fuente.
Acceso: Texto completo XML recuperado de Europe PMC.

[26] Greiner, S.; Kurth, K.; Fix, C.; Braun, T.; Franke, J.; Drummer, D. (2017). Influence of Material and Processing Parameters on the Surface Roughness of Injection-Molded Ceramic Parts. DOI: 10.4416/JCST2017-00009. Fuente.
Acceso: PDF completo recuperado, tabla 3 y métodos.

[27] Justen, P.; Montakhab, E.; Thomas, N.; Clemens, F. (2026 (online 2025)). Thermoplastic material extrusion additive manufacturing with in-situ milling: A novel approach for shaping of ceramics. DOI: 10.1016/j.oceram.2025.100881. Fuente.
Acceso: PDF completo recuperado, secciones 2 y 3.

[28] Didilis, K.; Marani, D.; Bihlet, U.; Haugen, A. B.; Esposito, V. (2022). Freeform injection molding of functional ceramics by hybrid additive manufacturing. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103197. Fuente.
Acceso: Manuscrito aceptado accesible, secciones 2 y 3.

[29] Basso, A.; Christensen, S. E.; Méndez Ribó, M.; Kjeldsteen, P.; Valler, P.; Pedersen, D. B.; Zhang, Y. (2020). Replication of micro-structured surfaces by integrating AM with PIM. Fuente.
Acceso: Comunicación íntegra accesible, 4 páginas.

[30] Basso, A.; Zhang, Y.; Kjeldahl Pløger, J.; Spangenberg, J.; Hansen, H. N. (2021). Analysing Powder Injection Moulding of a Helix Geometry Using Soft Tooling. DOI: 10.3390/polym13234183. Fuente.
Acceso: PDF editorial accesible, métodos y resultados.

[31] Wick-Joliat, R.; Tschamper, M.; Kontic, R.; Penner, D. (2021). Water-soluble sacrificial 3D printed molds for fast prototyping in ceramic injection molding. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102408. Fuente.
Acceso: Resumen y contenido editorial indexado; PDF no recuperado en esta revisión.

[32] 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. DOI: 10.1016/j.ceramint.2026.04.107. Fuente.
Acceso: Resumen y secciones editoriales indexadas.

[33] Oliveira, M.; Olhero, S.; Rocha, J.; Ferreira, J. M. F. (2003). Controlling hydrolysis and dispersion of AlN powders in aqueous media. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00065-1. Fuente.
Acceso: Resumen y extractos de artículo primario.

[34] Fraunhofer IKTS (s. f.). Ceramic injection molding. Fuente.
Acceso: Página técnica institucional.

[35] Formlabs (s. f.). Injection molding. Fuente.
Acceso: Guía oficial indexada.

[36] INMATEC (s. f.). INMAPOM: Ceramic Feedstocks, Product programme. Fuente.
Acceso: Ficha oficial PDF íntegra, 1 página.

[37] INMATEC (2024). INMAPOM K3030 Technical Datasheet. Fuente.
Acceso: Ficha oficial PDF íntegra, 2 páginas.

[38] INMATEC (noviembre 2017). INMAPOM K3030 Technisches Datenblatt. Fuente.
Acceso: PDF oficial completo descargado, 2 páginas; fecha en p. 2.

[39] German, R. M.; Bose, A. (1997). Injection Molding of Metals and Ceramics. MPIF. ISBN 9781878954619. Fuente.
Acceso: Metadatos y portada legal de la vista previa editorial indexada; no lectura del libro completo.

[40] Heaney, D. F. (ed.) (2012). Handbook of Metal Injection Molding. Primera edición. Woodhead. ISBN 9780857090669. Fuente.
Acceso: Página editorial, descripción y metadatos; no lectura integral de capítulos.

[41] Heaney, D. F. (ed.) (2019). Handbook of Metal Injection Molding. Segunda edición. Woodhead. ISBN 9780081021521. DOI: 10.1016/C2018-0-01641-2. Fuente.
Acceso: Página editorial e índice completo; no lectura integral de capítulos.

[42] Enneti, R. K.; Park, S. J.; German, R. M.; Atre, S. V. (2012). Review: Thermal Debinding Process in Particulate Materials Processing. Materials and Manufacturing Processes 27(2), 103-118. DOI: 10.1080/10426914.2011.560233. Fuente.
Acceso: Resumen y metadatos primarios; no lectura del texto completo.

[43] Basso, A.; Zhang, Y.; Yilan, G.; Spangenberg, J.; Hansen, H. N. (2021). Effect of powder particle size on the rheology of feedstocks for low pressure powder injection moulding. euspen, 21st International Conference. Fuente.
Acceso: Comunicación completa descargada, 4 páginas; métodos y conclusión.

[44] Novák, M.; Hausnerová, B.; Pata, V.; Sanétrník, D. (2024). On the possibilities of merging additive manufacturing and powder injection molding in the production of metal parts. Rapid Prototyping Journal 30(11), 50-58. DOI: 10.1108/RPJ-02-2023-0047. Fuente.
Acceso: PDF editorial completo en repositorio institucional, 9 páginas.

[45] Metal Powder Industries Federation (s. f.). Metal Injection Molding. Fuente.
Acceso: Página institucional completa.

[46] Durofer AG (s. f.). MIM - Metal Injection Molding. Fuente.
Acceso: Página oficial completa.

[47] MPIF / ARC Group Worldwide (s. f.). Directory of Powder Metallurgy Fabricators and Suppliers: ARC Group Worldwide. Fuente.
Acceso: Ficha de empresa en directorio institucional, apartado Manufacturing Capabilities.

[48] 3Dresyns (s. f.). Ceramic, metal & polymer powder feedstock slurries for injection in 3D printed molds. Fuente.
Acceso: Página oficial de colección; fichas de producto contrastadas.

[49] 3Dresyns (2026). Ceramic Slurry CS YSZ1 Yttria-stabilized zirconia. Technical Datasheet, version 1.3, August 2026. Fuente.
Acceso: PDF oficial completo, 3 páginas; descripción y proceso en pp. 1-2.

[50] 3Dresyns (2026). Metal Slurry MS Ti1 Titanium. Technical Datasheet, version 1.0, March 2026. Fuente.
Acceso: Ficha técnica web oficial completa; versión y fecha declaradas al pie.

[51] 3Dresyns (s. f.). Ceramic and metal slurries feedstock for Ceramic & Metal Injection Molding CIM & MIM and additive manufacturing of technical ceramics and metals. Fuente.
Acceso: Página técnica oficial completa; oferta de formulación a medida.