



En busca de la precisión en la tecnología MEAM-HP: Afectación de parámetros de fabricación en las contracciones dimensionales tras el sinterizado de piezas de bronce

Mario Lozano Corona^{1,2}, Laura Castañón Jano^{1,2}, Elena Blanco Fernández²

¹Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria

²GITECO. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria

La fabricación aditiva ha experimentado una notable evolución desde sus inicios en la década de 1980. Lo que comenzó como una herramienta de prototipado para diseñadores e ingenieros, hoy en día se ha convertido en una tecnología clave en la producción de piezas personalizadas, componentes industriales y hasta tejidos biológicos. El progreso en materiales, velocidad de impresión y precisión ha permitido que la impresión 3D se expanda a sectores como la medicina, el aeroespacial y la automoción, abriendo nuevas fronteras en la fabricación de objetos complejos a bajo costo y con mayor eficiencia.

Una nueva técnica de fabricación en el ámbito de la impresión 3D es MEAM-HP (Material Extrusion Additive Manufacturing High-filled Polymer), a través de la cual es posible realizar piezas de metal con impresoras FDM. Los filamentos están compuestos por un 80-90% de polvo de metal, siendo el resto un aglutinante polimérico. Una vez finalizada la impresión se logra eliminar la parte polimérica, obteniendo la pieza de metal con características similares a piezas de metal fabricadas por procesos tradicionales, utilizando dos tratamientos térmicos.

La principal limitación de esta técnica constructiva es la contracción que experimentan las piezas al llevar a cabo los dos procesos térmicos necesarios para obtener la pieza 100% metálica.

Este estudio analiza cómo diferentes parámetros, como el porcentaje de relleno, la orientación de impresión de las piezas o la orientación de las piezas durante los tratamientos térmicos, pueden afectar al resultado final obtenido en términos de contracciones. Se utilizará un filamento de bronce, cuyo contenido metálico es del 88-90%.

Se realizarán diferentes probetas con formas octaédricas, porcentajes de relleno entre el 40 y 90%, siendo impresas en horizontal (apoyada la cara de mayor tamaño sobre la cama de impresión) y en vertical. Además, se realizarán los tratamientos térmicos de las probetas también en posición horizontal y vertical.

Se realizará un diseño de experimentos para evaluar los parámetros comentados y se creará una función matemática que describa la influencia del porcentaje de relleno y orientación de las piezas durante la impresión y la realización de los tratamientos en las contracciones sufridas por la pieza y en su reducción de peso.

1. Introducción

La impresión 3D ha experimentado una evolución notable en los últimos años, transformándose desde una tecnología destinada principalmente a prototipos rápidos y fabricación de piezas sencillas, hacia una herramienta integral para la producción avanzada. Gracias a la mejora de los materiales disponibles, la precisión de las impresoras y el constante desarrollo de nuevas técnicas de fabricación aditiva, los procesos de impresión se han vuelto más rápidos, económicos y flexibles. Esta evolución ha permitido la creación de geometrías complejas con niveles de detalle impensables hace solo unos años, lo que ha incrementado su adopción en sectores altamente especializados y con requisitos técnicos exigentes [6], [3].

Con el avance continuo en la tecnología, la impresión 3D se perfila como una solución clave para el futuro de la fabricación. Su capacidad para permitir una producción personalizada y de alta precisión, combinada con el potencial de optimización, abre un abanico de posibilidades para la creación de productos innovadores. Además, el impulso hacia una mayor eficiencia en el uso de materiales y recursos, junto con la reducción de los tiempos de fabricación, posiciona a la impresión 3D como una herramienta esencial dentro de las estrategias de manufactura de vanguardia, con un impacto creciente sobre la competitividad y la sostenibilidad industrial.

En este marco de avance continuo, surgen nuevas técnicas de fabricación aditiva que buscan superar las limitaciones de los métodos tradicionales [4], [9]. Estas innovaciones no solo mejoran la velocidad y la precisión, sino que también abren nuevas posibilidades en cuanto a la complejidad geométrica y las propiedades de los materiales. Con el desarrollo de estas tecnologías emergentes, la impresión 3D se posiciona cada vez más como una herramienta clave para la fabricación de componentes con características funcionales específicas, adaptándose a las exigencias más avanzadas de la industria.

Por lo general, la impresión 3D de metal se basa en tecnologías que utilizan la materia prima en forma de polvo, el cual a través de diferentes métodos (uso de láseres, haces de electrones, aglutinante, etc.) es fusionado [13], [5]. El principal inconveniente de estas técnicas de fabricación es el alto coste que suponen, por ello el MEAM HP se posiciona como la alternativa de impresión 3D de metal económica, ya que el coste de fabricación es muy bajo en comparación con el resto de tecnologías.

Otro de ejemplo de fabricación de piezas con contenido metálico es aquellas en las que la pieza no es 100% metálica, si no que incorpora una parte de este material, con lo que se busca mejorar propiedades metálicas finales de la pieza, aumentar peso, dar una segunda vida a ese desecho metálico [1].

Una de estas nuevas técnicas de fabricación es la conocida como “Material Extrusion Additive Manufacturing High-filled Polymer”, o “MEAM HP”, la cual es utilizada para producir piezas metálicas, cerámicas o de cermet [12], [8].

El gran avance que aporta esta técnica es la posibilidad de realizar piezas de los materiales anteriormente mencionados con impresoras 3D de modelado por deposición fundida (FDM). En estos equipos es utilizada la materia prima en forma de filamento, el cual está formado por una gran parte del material del que se desean obtener las piezas y una pequeña cantidad de un aglutinante polimérico, normalmente PLA o ABS. En este caso, el filamento utilizado es de bronce, 88-90%, y PLA el cual actúa de aglutinante, 12-10%.

Una de las problemáticas fundamentales de esta técnica son las contracciones que experimentan las piezas durante los tratamientos térmicos que son necesarios para la eliminación de la parte polimérica de las piezas impresas. Por ello, resulta importante tratar de estudiar el comportamiento de las piezas durante los procesos térmicos, y como optimizarlos para obtener los mejores resultados [2] y las principales características de las piezas fabricadas [11]. Un aspecto clave que es necesario definir de forma precisa son las contracciones dimensionales que se producen [10], ya que es la única forma de lograr fabricar piezas con tolerancias dimensionales admisibles.

En el trabajo presentado en el artículo [7] se fabrica una pieza de forma iterativa, compensando el tamaño de la misma hasta llegar a una pieza que cumpla con los requisitos dimensionales.

Este estudio se centra en el análisis de las deformaciones experimentadas por las piezas fabricadas con filamento de bronce tras el proceso de debinding y sinterizado, con el fin de cuantificarlas, así como las reducciones de peso.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales y equipos

El material utilizado en esta investigación es filamento de bronce. Se trata de un filamento de 1,75 mm de diámetro, de la empresa “The VirtualFoundry”, almacenado en bobina de 0,5 kg. Está compuesto por un 88-90% de partículas de bronce, y un 12-10% de aglutinante polimérico (PLA). Tiene una densidad de 4,29g/cc – 4,5g/cc.

Para realizar los tratamientos térmicos, debinding y sinterizado, es necesario utilizar otros productos como silicato de magnesio, óxido de alúmina y carbón de sinterizado. Los dos primeros productos son utilizados para ayudar a la pieza a mantener la forma y a repartir el calor de forma proporcional a su alrededor. El carbón de sinterizado es utilizado durante el sinterizado para evitar la oxidación de la pieza.

El equipo en que se realizó la impresión fue una impresora Artillery Sidewinder X1, la cual cuenta con un volumen de impresión de 300x300x400mm, con boquilla de acero.

La mufla utilizada para los tratamientos térmicos es de la marca Hobersal, modelo JMM6, fabricada en España y con temperatura de funcionamiento máxima de 1600°C.

En el estudio se utiliza un escáner 3D, para la digitalización de las piezas fabricadas, y así facilitar su comparación. El equipo utilizado para dicha tarea es Shining Einscan Pro HD y el software usado para realizar la comparativa entre diferentes muestras, así como modificar y visualizar los archivos generados es Geomagic Essentials 2. Los escaneos realizados alcanzan una precisión de 0,04 mm.

2.2. Fabricación de las probetas

El proceso de impresión de las piezas es idéntico al utilizado para producir objetos de plásticos en equipos con tecnología FDM. Se basa en la extrusión de un filamento a través de una boquilla caliente, que lo funde y lo deposita capa por capa sobre una base. Cada capa se enfría y solidifica rápidamente, lo que permite que la siguiente capa se adhiera a la anterior, hasta alcanzar la altura total de la pieza.

Una vez la impresión ha finalizado, se obtiene la pieza compuesta por la mezcla del material metálico y el aglutinante (pieza verde, del inglés green part). Para eliminar la parte polimérica y obtener la pieza metálica final se realizan dos tratamientos térmicos.

El primer tratamiento térmico es llamado debinding. Consiste en elevar la temperatura de la pieza para que la parte polimérica de la misma se evapore. La pieza es introducida en un crisol enterrada en el óxido de alúmina, manteniendo una distancia 15 mm entre la pieza y las paredes y superficie superior del silicato de magnesio. Una vez el crisol es introducido en la mufla comienza el calentamiento. La curva de temperatura utilizada (**Figura 1**) durante el debinding parte de temperatura ambiente, realizando una rampa de 8,6 horas hasta los 482°C, manteniendo esa temperatura durante 4 horas. Una vez finaliza este tiempo se deja enfriar hasta que alcanza la temperatura ambiente.

Después, se realiza un sinterizado de la pieza para eliminar los huecos generados durante el debinding en los que había partículas de aglutinante. La pieza es enterrada en silicato de magnesio dentro de un crisol, manteniendo una distancia 15 mm entre la pieza y las paredes y superficie superior del silicato de magnesio. Además, se añade una capa del carbón de sinterizado por encima del silicato, para evitar la entrada del oxígeno al interior del crisol, y se cubre con un papel especial para muflas. A continuación, es posible comenzar con el tratamiento térmico. La curva de temperatura utilizada (**Figura 1**) durante el sinterizado parte de temperatura ambiente, realizando una rampa de 7,6 horas hasta los 885°C, manteniendo esa temperatura durante 5 horas.

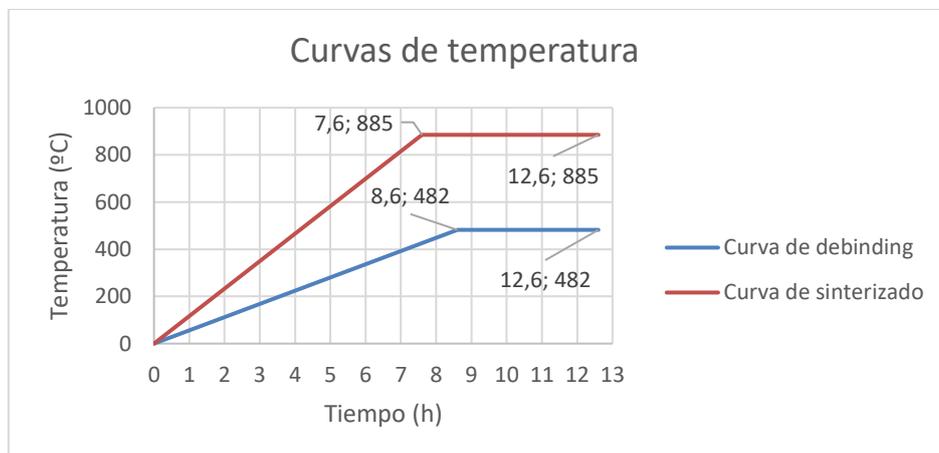


Figura 1: Curvas de temperatura.

En la **Figura 2**, puede verse una misma pieza en los tres pasos que se realizan, de izquierda a derecha pieza verde, pieza tras el debinding y pieza tras el sinterizado. La pieza sinterizada fue sometida a una pequeña operación de pulido para eliminar restos de los materiales auxiliares utilizados y el acabado de color oscuro que presentaba, para que luciera el color del bronce. Se puede comprobar que el aspecto entre ellas es muy diferente, pasando de un color marrón en el momento en que el metal está mezclado con el aglutinante, frente al color oscuro que adquiere la pieza tras el debinding y el color brillante de las piezas sinterizadas.



Figura 2: Pieza impresa, tras el debinding y tras el sinterizado.

Para el diseño de las probetas se utilizó el software de Autodesk Inventor. Las probetas realizadas tienen forma octaédrica, de 10x10x30 mm. En la **Figura 3** pueden apreciarse dos probetas orientadas en posición vertical y horizontal (orientaciones que serán evaluadas en el experimento). El término espesor de la probeta se correspondería con “a”, el ancho con “b” y el largo con “c”.

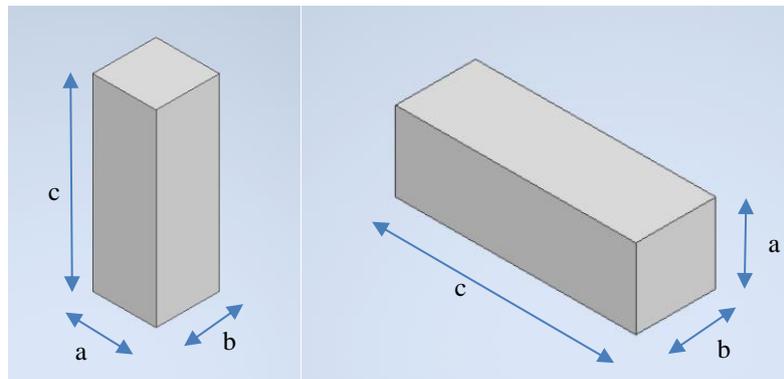


Figura 3: Probetas.

El slicer utilizado para generar los gcodes para imprimir fue Ultimaker Cura. Los principales parámetros de impresión utilizados son los que pueden apreciarse en la **Tabla 1**, siendo los recomendados por el fabricante del filamento.

Tabla 1: Parámetros de impresión.

Altura Capa	0,17 mm
Ancho línea	0,6 mm
Nº de paredes	2
Capas superiores e inferiores	3
Temperatura impresión	220 °C
Temperatura cama	65 °C
Flujo	120%
Velocidad	20 mm/s
Retracción	Desactivada
Refrigeración	Desactivada
Boquilla	0,6 mm

2.3. Diseño de experimentos

Para la elección de los casos estudiados se realizó un Diseño de experimentos (DOE). Un DOE es una herramienta estadística cuyo objetivo es averiguar la influencia de unos determinados factores sobre una variable de interés. Cuatro de los tipos de Diseño de Experimentos más populares son el Factorial 2k, de superficie de respuesta, mezcla de DOE y Taguchi. Para la realización del DOE, definición de los casos y para la interpretación de resultados se utilizó el software Minitab.

En esta investigación se ha realizado un DOE Factorial, debido a que aporta un número reducido de casos y es el utilizado cuando se tienen variables no estudiadas previamente. Es una primera aproximación, realizando un segundo estudio más exhaustivo si resulta que los factores afectan a las variables de interés.

Como variables de entrada se escogió el porcentaje de relleno de las piezas, la orientación de impresión de las probetas y la orientación de las probetas durante los tratamientos térmicos, variable llamada a partir de este momento orientación de sinterizado. La primera de las variables es cuantitativa y se seleccionó 40% y 90% de relleno. El resto de variables son cualitativas, orientación vertical u horizontal para ambas variables.

Dado que se trata de un Diseño de Experimentos (DOE) factorial, el número inicial de casos a evaluar sería 8. Sin embargo, con el objetivo de ampliar el análisis y considerar un mayor número de alternativas, se decidió incluir puntos centrales. Debido a la presencia de una variable cuantitativa y dos variables cualitativas en el experimento, el número total de casos se incrementó a 12. La **Figura 4** muestra las combinaciones de las tres variables de entrada evaluadas. En cuanto a la orientación de impresión, esta toma los valores de 40 %, 65 % (correspondiente a los puntos centrales) y 90 %. Por otro lado, las orientaciones consideradas tanto para la impresión como para el sinterizado son horizontal y vertical.

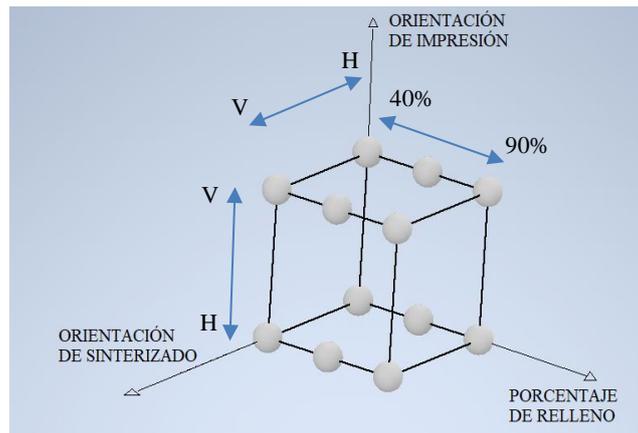


Figura 4: Representación gráfica de los casos del DOE.

En la **Tabla 2** se resumen los casos del experimento.

Tabla 2: Casos realizados.

Caso	Porcentaje de relleno	Orientación de impresión	Orientación de sinterizado
1	40	V	V
2	90	V	V
3	40	H	V
4	90	H	V
5	40	V	H
6	90	V	H
7	40	H	H
8	90	H	H
9	65	V	V
10	65	H	V
11	65	V	H
12	65	H	H

3. Resultados

Los resultados evaluados en el diseño de experimentos son las variaciones dimensionales de las probetas octaédricas fabricadas y la disminución de peso que experimentan de la pieza verde a la sinterizada.

3.1. Casos descartados

A lo largo de la fabricación de las diferentes probetas del experimento se obtuvieron algunos ejemplos que no cumplían con los requisitos buscados, los cuales fueron descartados. Varios de esos descartes fueron debidos a pruebas realizadas para obtener los parámetros finales de fabricación.

Alguno de los ejemplos de descartes son los que pueden verse en la **Figura 5**. En ella puede verse una imagen (**Figura 5a**) de una probeta sinterizada a una temperatura demasiado alta, cercana a la temperatura de fusión del material, la cual experimentó una deformación muy grande. Otra, **Figura 5b**, tras ver que las dimensiones eran

demasiado grandes se cortó para ver el interior y se comprobó que el sinterizado no se había completado correctamente, ya que el interior de la probeta no tenía el aspecto de bronce buscado, si no que mantenía polvo oscuro en su centro. También, en la **Figura 5c**, puede verse un ejemplo de una probeta muy hinchada por lo que fue descartada (**Figura 5c**) y por último (**Figura 5d**) otra con dos surcos en uno de sus laterales.

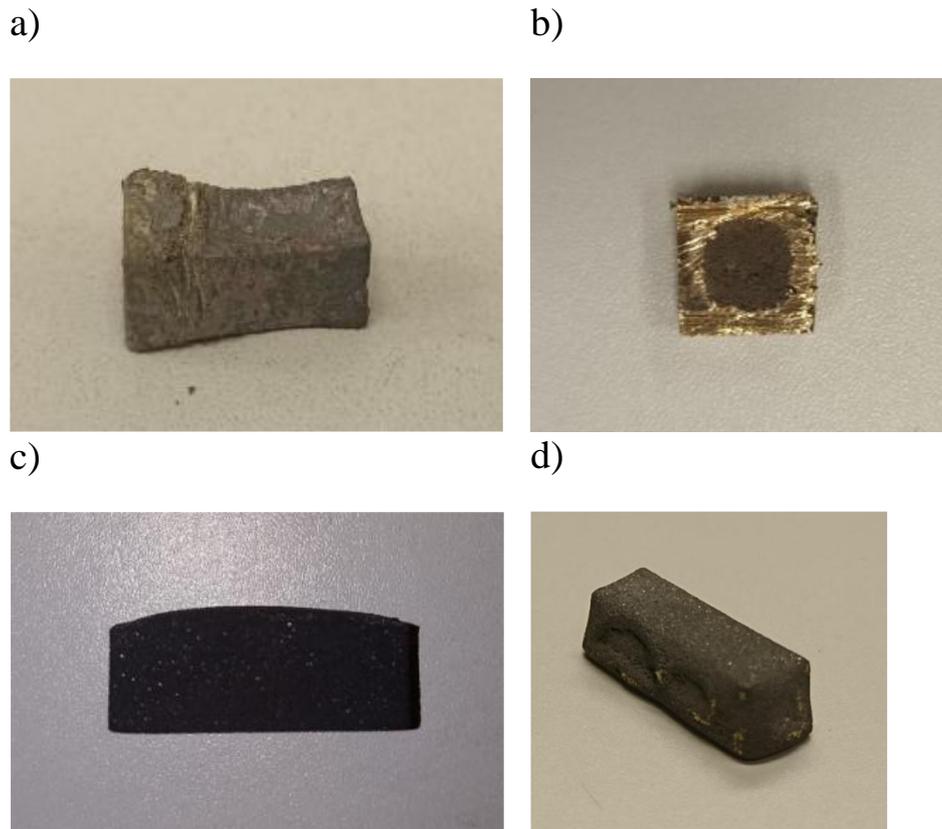


Figura 5: Ejemplos de casos descartados a) Probeta sometida a temperatura muy alta, b) Probeta mal sinterizada, c) Probeta hinchada y d) Probeta con defectos en un lateral.

3.2. Mediciones

Para cada una de las probetas fabricadas, tanto para la pieza en verde, tras el debinding y tras el sinterizado, se realizaron 3 mediciones del largo, el ancho y el espesor en diferentes puntos, utilizando un calibre. Para el cálculo de las dimensiones de la probeta se realizó la media de las 3 medidas tomadas.

Además, las probetas fueron pesadas en una báscula de precisión, cuya incertidumbre es 0,01 g.

Posteriormente se calcularon las diferencias porcentuales que había entre la pieza en verde y las piezas tras el debinding y el sinterizado. La **Tabla 3** muestra la media de los valores obtenidos del peso para tres réplicas de cada caso realizadas. En cambio, en la **Tabla 4**, **Tabla 5** y **Tabla 6** puede apreciarse las medias de las medidas de las tres réplicas de cada caso, relativas al largo, ancho y espesor respectivamente.

Tabla 3: Pesos de las probetas.

Casos		Peso impresión (g)	Peso Debinding (g)	Peso sinterizado (g)	Pérdida debinding (%)	Pérdida sinterizada (%)
Caso 1	40VV	10,70	9,92	9,57	7,34	10,56
Caso 2	90VV	14,96	13,74	13,34	8,17	10,80
Caso 3	40HV	10,19	9,38	9,11	7,93	10,56
Caso 4	90HV	14,02	12,77	12,55	8,86	10,50
Caso 5	40VH	10,86	10,04	9,71	7,49	10,54
Caso 6	90VH	15,33	13,98	13,70	8,85	10,66
Caso 7	40HH	9,92	9,15	8,87	7,76	10,58
Caso 8	90HH	14,98	13,71	13,33	8,52	11,01
Caso 9	65VV	13,29	12,14	11,86	8,68	10,78
Caso 10	65HV	12,95	11,83	11,57	8,65	10,68
Caso 11	65VH	13,38	12,25	11,96	8,40	10,60
Caso 12	65HH	12,99	11,90	11,61	8,40	10,63

Valor máximo	15,33	13,98	13,70	8,86	11,01
Valor mínimo	9,92	9,15	8,87	7,34	10,50

Tabla 4: Largo de las probetas.

Casos		Largo impresión (mm)	Largo debinding (mm)	Largo sinterizado (mm)	Pérdida debinding (%)	Pérdida sinterizado (%)
Caso 1	40VV	29,88	29,24	24,16	2,14	19,12
Caso 2	90VV	29,83	29,92	24,01	-0,28	19,51
Caso 3	40HV	30,28	28,66	24,52	5,36	19,03
Caso 4	90HV	30,12	29,71	25,05	1,36	16,81
Caso 5	40VH	29,93	29,53	25,42	1,36	15,08
Caso 6	90VH	29,98	29,87	25,23	0,38	15,84
Caso 7	40HH	30,16	29,19	25,58	3,23	15,21
Caso 8	90HH	30,19	30,19	25,92	-0,01	14,14
Caso 9	65VV	29,95	29,45	25,24	1,65	15,71
Caso 10	65HV	30,22	29,38	25,32	2,78	16,20
Caso 11	65VH	29,93	29,69	25,31	0,78	15,42
Caso 12	65HH	30,28	29,85	26,01	1,42	14,10
Valor máximo		30,28	30,19	26,01	5,36	19,51
Valor mínimo		29,83	28,66	24,01	-0,28	14,10

Tabla 5: Ancho de las probetas.

Casos		Ancho impresión (mm)	Ancho debinding (mm)	Ancho sinterizado (mm)	Pérdida debinding (%)	Pérdida sinterizado (%)
Caso 1	40VV	10,28	9,91	8,57	3,60	16,69
Caso 2	90VV	10,37	10,46	8,85	-0,90	14,66
Caso 3	40HV	10,35	9,92	8,41	4,19	18,74
Caso 4	90HV	10,33	10,44	8,89	-1,03	13,94
Caso 5	40VH	10,32	9,75	8,57	5,46	16,96
Caso 6	90VH	10,32	10,73	9,16	-3,94	11,21
Caso 7	40HH	10,31	10,07	8,82	2,39	14,51
Caso 8	90HH	10,54	10,89	9,14	-3,39	13,26
Caso 9	65VV	10,24	10,23	8,81	0,10	13,96
Caso 10	65HV	10,37	10,37	9,09	-0,06	12,32
Caso 11	65VH	10,27	10,36	9,02	-0,84	12,23
Caso 12	65HH	10,38	10,38	9,10	0,06	12,36
Valor máximo		10,54	10,89	9,16	5,46	18,74
Valor mínimo		10,24	9,75	8,41	-3,94	11,21

Tabla 6: Espesor de las probetas.

Casos		Espesor impresión (mm)	Espesor debinding (mm)	Espesor sinterizado (mm)	Pérdida debinding (%)	Pérdida sinterizado (%)
Caso 1	40VV	10,27	9,90	8,52	3,57	17,01
Caso 2	90VV	10,35	10,43	8,81	-0,84	14,82
Caso 3	40HV	10,04	9,79	8,15	2,56	18,82
Caso 4	90HV	9,90	10,27	8,57	-3,74	13,50
Caso 5	40VH	10,27	9,89	8,34	3,70	18,82
Caso 6	90VH	10,38	10,71	9,09	-3,21	12,43
Caso 7	40HH	10,02	9,62	8,06	3,96	19,53
Caso 8	90HH	10,04	10,07	8,20	-0,30	18,30
Caso 9	65VV	10,33	10,29	8,92	0,45	13,65
Caso 10	65HV	10,00	10,00	8,60	0,00	13,97
Caso 11	65VH	10,22	10,11	8,70	1,11	14,87
Caso 12	65HH	10,11	9,88	8,34	2,21	17,48
Valor máximo		10,38	10,71	9,09	3,96	19,53
Valor mínimo		9,90	9,62	8,06	-3,74	12,43

En el caso del peso de las probetas la variación máxima que se produce entre los diferentes casos evaluados, entre la pieza impresa y tras el sinterizado se sitúa en un 0,5%, mientras que entre la pieza impresa y tras el debinding es de un 1,5%. Al existir una variación tan pequeña puede concluirse que tras el sinterizado todo el PLA que contenía la probeta fue eliminado, obteniendo de esa forma la probeta totalmente metálica.

Las variaciones en las dimensiones de largo, ancho y espesor de las probetas entre las piezas impresas y las mismas tras los procesos de sinterizado varían entre el 10 y 20%. En cambio, tras el debinding las variaciones de los casos

se encuentran entre un valor negativo, y un 5%. Esta variación tan particular producida durante el debinding es debida a la posibilidad de hinchado de las probetas, debido al gas generado internamente por la eliminación de la parte polimérica durante el tratamiento térmico, lo que genera un aumento de las dimensiones (y por tanto valor negativo). Además, en alguna ocasión produjo que las capas laterales de la probeta se separaran del relleno, produciendo una rotura en las piezas y haciendo que no fueran válidas para el experimento.

Este fenómeno se ha demostrado que es mayor cuanto mayor sea el porcentaje de relleno, ya que existe una mayor cantidad de aglutinante, y se produce tanto en piezas realizadas en vertical como en horizontal. El hinchado es mayor cuanto mayor es la altura, ya que el gas tiende a ascender.

3.3. Escaneado 3D

Tras la medición con el calibre las piezas son escaneadas y comparadas entre sí.

En la **Figura 6a** puede apreciarse una comparativa de las probetas del caso 7 (40 HH), de izquierda a derecha probeta impresa, tras el debinding y tras el sinterizado, respectivamente. En ella es posible visualizar las diferencias físicas de tamaño que experimentan las piezas en los diferentes puntos de fabricación, y la deformación que experimenta. Tras el sinterizado puede apreciarse como las paredes adquieren una cierta inclinación, ya que en la parte superior de la probeta se producen mayores contracciones y como la superficie superior se curva, reduciéndose el alto de la probeta de forma más notable por el centro. Estas deformaciones son más notables en este caso ya que es de una probeta con el porcentaje de relleno menor.

En la **Figura 6b**, además puede apreciarse un análisis de desviación de la probeta impresa frente a la misma tras el sinterizado. En ella se representa una escala de colores que indica las diferencias en mm que tiene la probeta entre los dos estados comentados. La cara de color rojo indica que hay una desviación de esa zona de alrededor de 5 mm, mientras que en la cara lateral de color verde se encuentra entre 1 y 2 mm, y la cara superior en color amarillo entre 2 y 2,5 mm.

Las mismas comparativas pueden encontrarse en la **Figura 7**, pero para el caso 9 (65 VV). En este caso, la probeta se encuentra en disposición vertical, en lugar de horizontal, ya que al tratarse de un caso cuyos tratamientos térmicos han sido realizados en vertical, esta posición facilita la comparativa y visión de la probeta. De igual forma se puede apreciar una cara de color rojo, que hace indicar la zona con mayor desviación. Puede apreciarse el hinchado que experimentan las probetas tras el debinding y como tratan de inflarse, sobre todo en la mitad superior. En la cara superior y en las laterales se nota como se han curvado, dando un aspecto de redondeo a la probeta. Tras el sinterizado y la contracción de la pieza, el hinchado se reduce, aunque sigue siendo visible la forma curvada de alguna de sus caras.

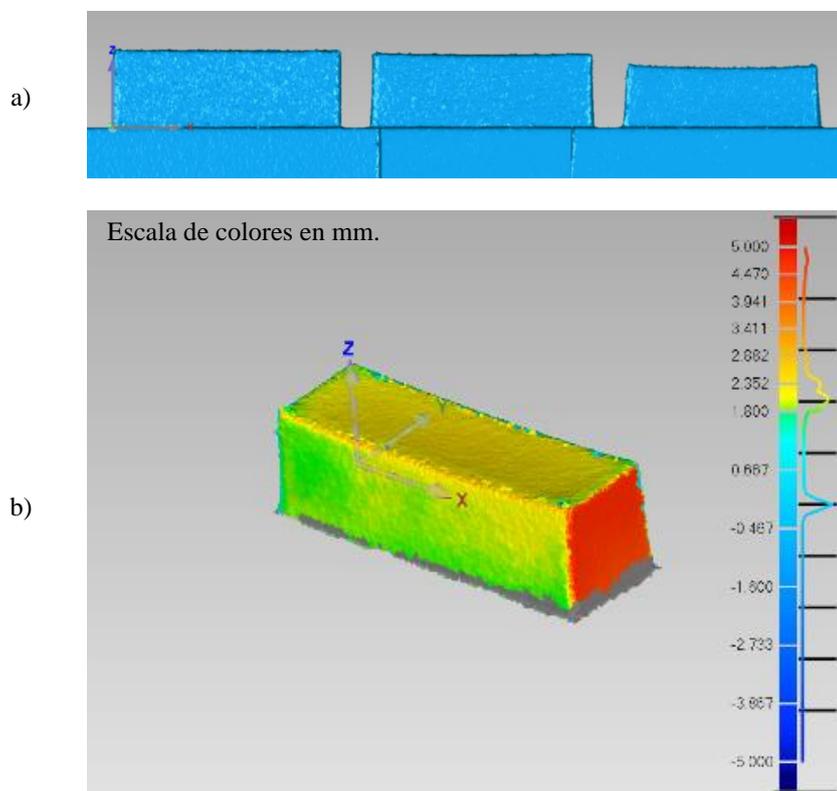


Figura 6: Escaneo de probeta del caso 7 en las tres fases (a) y desviaciones dimensionales (b).

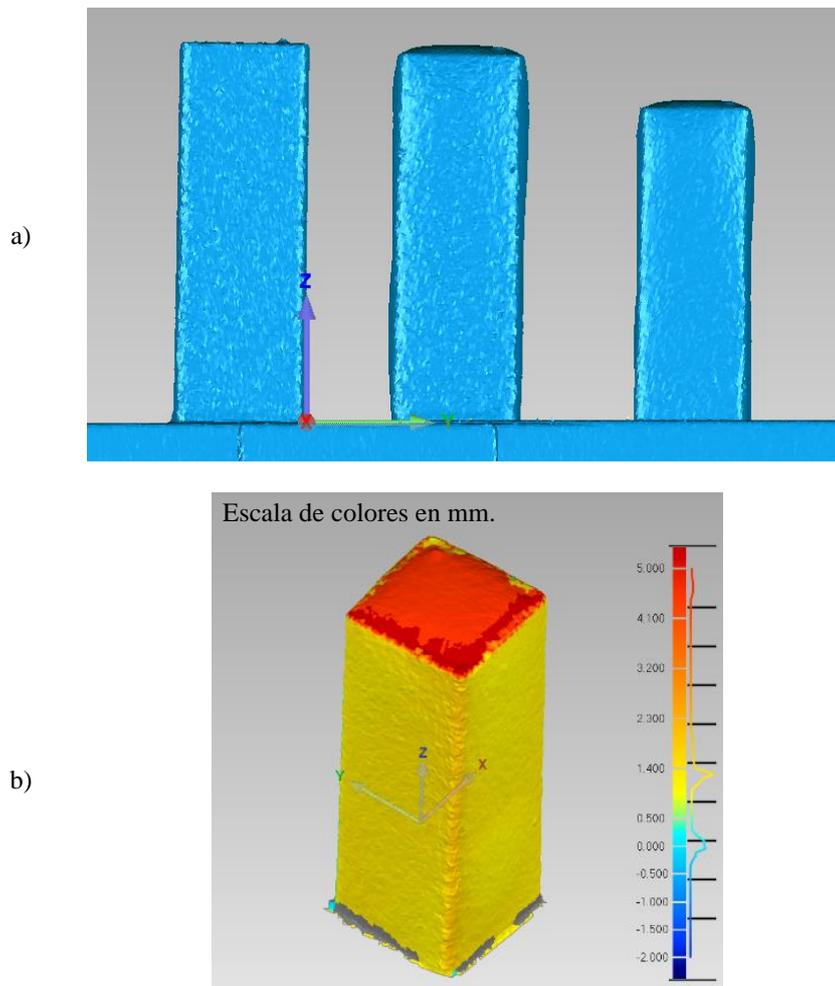


Figura 7: Escaneo de probeta del caso 9 en las tres fases (a) y desviaciones dimensionales (b).

3.4. Evaluación estadística del DOE

Una vez obtenidas las mediciones los resultados obtenidos son introducidos en el software Minitab, para realizar el análisis del diseño de experimentos factorial. En este caso, al tener 8 variables de salida (reducción de peso de las probetas tras el debinding y tras el sinterizado y reducción del largo, del ancho y del espesor de las probetas tras el debinding y tras el sinterizado) se obtienen 8 ecuaciones de regresión, una por cada variable, las cuales son modelos matemáticos que describen la relación existente entre unas variables dependientes (respuesta) con unas variables independientes (factores) en un experimento.

Las ecuaciones de regresión obtenidas para cada uno de los casos pueden apreciarse en la **Tabla 7**. También en la tabla puede apreciarse los valores R cuadrado para cada caso, métrica estadística que evalúa el ajuste del experimento. A es el porcentaje de relleno, B la orientación de impresión y C la orientación de sinterizado.

Tabla 7: Ecuaciones de regresión y valor de R cuadrado.

	Ec. Regresión	R-cuad (%)
pérdida peso debind.	$Y=6,990 + 0,01946 A$	63,82
pérdida peso sinter.	$Y=10,4206 + 0,00367 A + 0,0036 B - 0,1133 C - 0,00002 A*B + 0,00193 A*C - 0,1339 B*C + 0,00311 A*B*C$	82,91
Pérdida largo debind.	$Y=5,138 - 0,05320 A + 1,922 B - 1,204 C - 0,01918 A*B + 0,01101 A*C - 0,323 B*C$	97,57
Pérdida largo sinter.	$Y=16,348 - 1,383 C$	58,13

En busca de la precisión en la tecnología MEAM-HP

Pérdida ancho debind.	$Y=8,56 - 0,1245 A + 1,26 C - 0,0273 A*C$	90,73
Pérdida ancho sinter.	$Y=18,74 - 0,0692 A$	43,16
pérdida espesor debind.	$Y=7,897 - 0,10934 A - 0,257 B + 0,608 C + 0,00384 A*B - 0,00235 A*C - 0,754 B*C + 0,02268 A*B*C$	98,09
pérdida espesor sinter.	$Y=21,02 - 0,0757 A$	42,03

Los valores de R cuadrado para el debinding se encuentran por encima del 90%, salvo el caso de la pérdida del peso que es 63%. En cambio, para el sinterizado son valores inferiores, entre el 40 y 65%, producido por las pequeñas deformaciones que experimentan las probetas en sus dimensiones debido a los gases que se generan durante el debinding. Para el caso de la pérdida de peso tras el sinterizado el valor de R cuadrado si que es alto, un 82.91%.

Otro de los resultados obtenidos del análisis del experimento son las gráficas de Pareto, una herramienta gráfica que facilita la identificación de los términos del modelo que son más significativos y, por lo tanto, tienen una mayor influencia en la respuesta. En estas gráficas, las barras representan los efectos del modelo, siendo los efectos más significativos aquellos cuya altura es mayor. Además, se incluye una línea roja que marca el cuantil correspondiente al nivel de significancia ($1 - \alpha/2$), donde α es el nivel de significancia, establecido en este caso en 0,1. Cuando un término supera dicha línea, se considera estadísticamente significativo, lo que quiere decir que el factor tiene un efecto real sobre la variable de respuesta.

En las variables de salida evaluadas en el experimento el término con mayor influencia es el porcentaje de relleno (A), el cual es significativo en todas salvo en el caso de la reducción del largo tras el sinterizado. Esto indica que ese término es clave y debería ser el primero a tener en cuenta. Cualquier variación del relleno de la pieza produciría cambios en el aspecto de la pieza final y en su peso. Después del porcentaje de relleno, la mayor influencia la tiene la combinación de las variables B y C, es decir de la orientación de impresión y de la orientación de sinterizado.

Cabe destacar el caso particular de la reducción del largo tras el sinterizado, donde únicamente tiene una influencia significativa la orientación de sinterizado. La orientación de impresión es la variable de entrada con una menor influencia en los resultados, ya que únicamente es significativa en uno de los casos, el largo de la probeta tras el debinding. Esto indica que la orientación y el tamaño de las capas no son importantes. En las impresas en vertical tenemos capas de pequeño tamaño y ubicadas transversalmente al largo, mientras que en las horizontales son capas muy grandes y dispuestas longitudinalmente y paralelas al largo de la probeta, a pesar de esa gran diferencia no afecta al resto de variables. Por otro lado, la orientación de sinterizado afecta únicamente al largo de la probeta, esto es debido a que en función de la posición en la que se realice el sinterizado la probeta tiene una sección horizontal de tamaño muy diferente, sumado a las altas temperaturas y la acción de la gravedad, junto a la diferencia de la dimensión ubicada en vertical (10 o 30 mm) produce grandes cambios. Al tener la probeta en vertical, con sección horizontal pequeña la reducción del largo es mucho mayor.

Hay alguna variable de salida afectada únicamente por un término como la pérdida de peso en el debinding, la pérdida de largo en el sinterizado o la pérdida de ancho en el sinterizado, mientras que en el caso de la pérdida de largo en el debinding está afectado por un total de 6 términos.

Los diagramas de Pareto pueden apreciarse en la **Figura 8**.

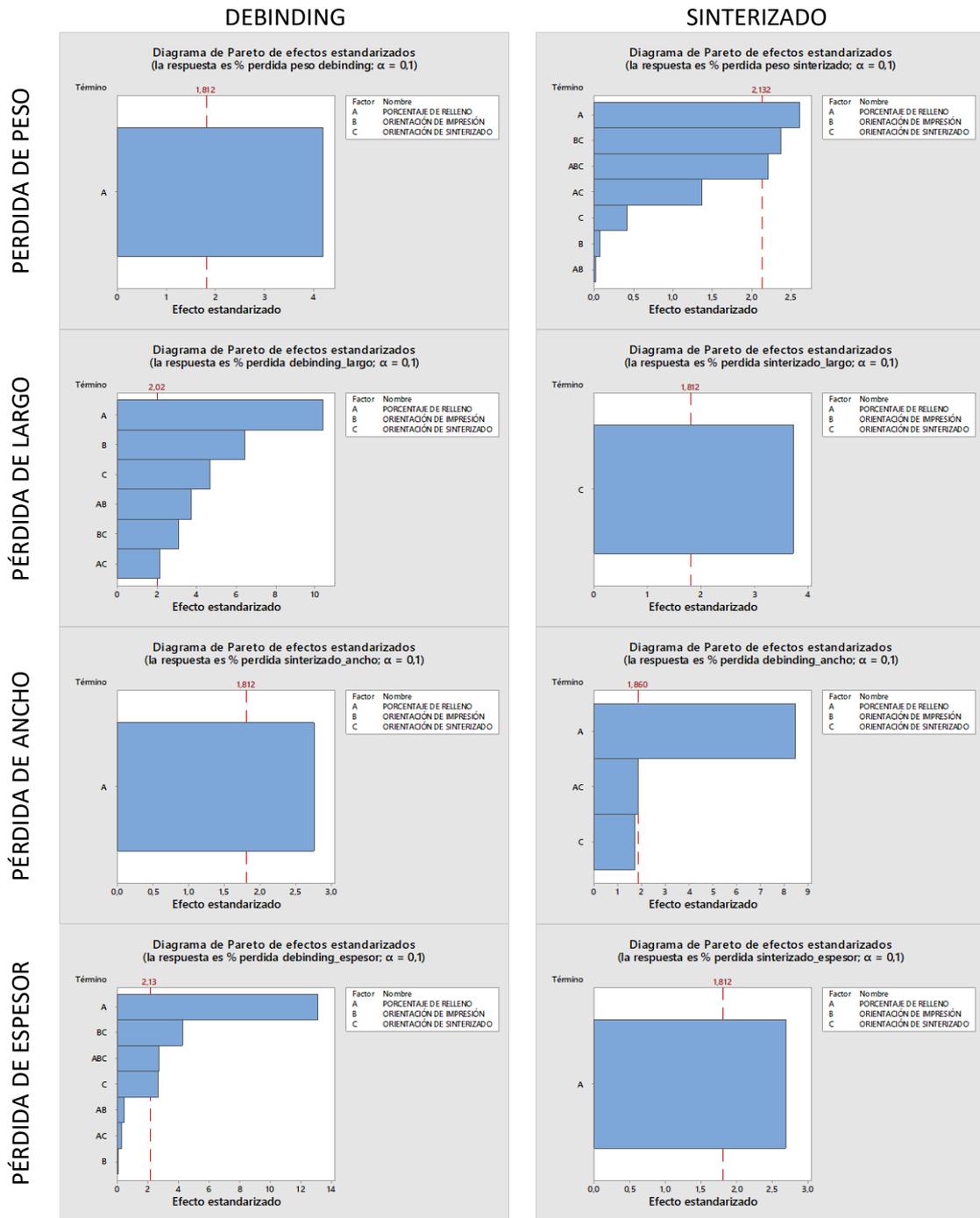


Figura 8: Gráficas de Pareto.

Otro aspecto clave a estudiar son los efectos principales, los cuales indican el impacto individual de cada factor sobre las diferentes variables. Los efectos principales de las variables estudiadas en este experimento están representados en la **Tabla 8**. El signo de los efectos principales expresa la dirección de influencia, si un factor es proporcional o inversamente proporcional a la variable de salida

Por ejemplo, en el caso del porcentaje de relleno puede comprobarse que es proporcional a las reducciones de peso tanto tras el sinterizado y el debinding. En cambio, es inversamente proporcional al resto de variables de salida. Esto quiere decir que si aumenta el porcentaje de relleno aumenta la pérdida de peso, pero se reduce la pérdida de largo, ancho y espesor.

Tabla 8: Efectos principales de cada término.

	A(adimensional)	B(%)	C(%)	AB(%)	AC(%)	BC(%)	ABC(%)
Pérdida peso debinding	0,97	-	-	-	-	-	-
Pérdida peso sinterizado	0,1835	0,0045	0,0238	-0,0011	0,0963	0,1366	0,1556
Pérdida largo debinding	-2,66	1,352	-0,977	-0,959	0,551	-0,645	-

Pérdida largo sinterizado	-2,766	-	-	-	-	-	-
Pérdida ancho debinding	-6,223	-	-1,023	-	-1,365	-	-
Pérdida ancho sinterizado	-3,461	-	-	-	-	-	-
Pérdida espesor debinding	-5,467	-0,015	0,911	0,192	-0,117	1,44	1,134
Pérdida espesor sinterizado	-3,784	-	-5	-	-	-	-

Una de las formas de comprobar la validez del ajuste del modelo, aspecto clave para la correcta evaluación de los resultados, son los gráficos de la probabilidad normal, residuos vs ajustes, histograma de los residuos y el gráfico de residuos frente al orden de observaciones. En la **Figura 9** puede apreciarse uno de los casos de este experimento, concretamente el de la pérdida del largo tras el debinding, para el resto son gráficos similares.

Para que el estudio haya sido correcto, en el primero de los gráficos (distribución normal) los residuos deberían estar repartidos siguiendo una línea recta, lo cual indicaría que se distribuyen de forma normal, en el gráfico de la derecha de la fila superior los residuos deberían encontrarse distribuidos aleatoriamente, sin patrones, por lo que la varianza de los residuos no cambiaría sistemáticamente con los valores ajustados. El gráfico izquierdo de la fila inferior debería mostrar una campana simétrica y el cuarto de nuevo una distribución aleatoria, lo que indicaría la no existencia de series.

En este caso los gráficos son similares a los resultados teóricos para un buen ajuste.

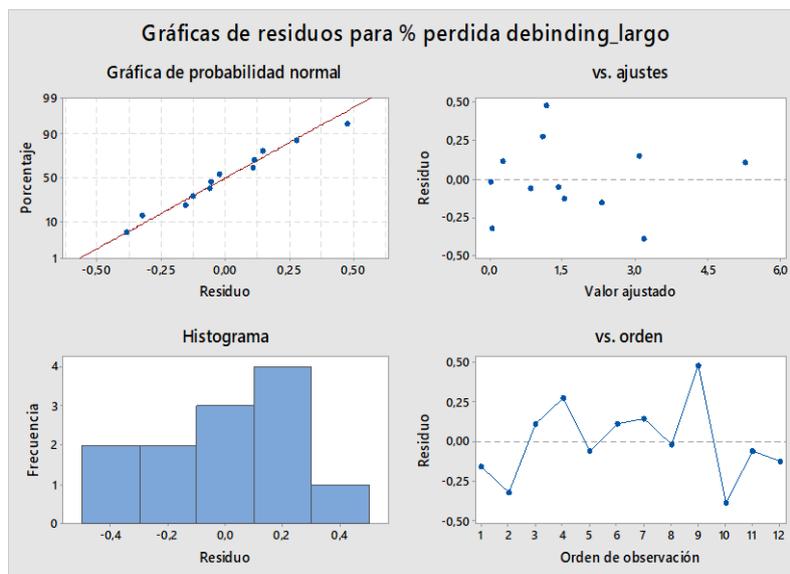


Figura 9: Gráficas de residuos.

4. Conclusiones

Este estudio, el cual es un análisis inicial, ha analizado cómo diferentes parámetros, como el porcentaje de relleno o la orientación de impresión y del sinterizado de las piezas, pueden afectar al resultado final obtenido en términos de contracciones y peso de las piezas fabricadas. Para este análisis se planteó un diseño de experimentos con 12 combinaciones diferentes, siendo las variables de salida las pérdidas de peso y de largo, ancho y espesor tras el debinding y el sinterizado de las probetas.

Se ha comprobado que el parámetro que mayor influencia tiene es el porcentaje de relleno, afectando de forma significativa a 7 de las 8 variables de salida planteadas, seguido de la orientación de sinterizado y la combinación de las orientaciones de impresión y sinterizado como factores que a más variables.

Además, se ha comprobado que el porcentaje de reducción de peso para todos los casos es similar, con diferencias máximas de 1,5% en debinding y 0,5% en sinterizado.

La orientación del sinterizado afecta en gran medida a la reducción dimensional de las probetas. Particularizando para el largo, en el caso de probetas sinterizadas en vertical este se reduce entorno a un 19%, en cambio en el caso de aquellas tratadas en horizontal era de un 15%.

El ancho y espesor de la probeta ve mayor influencia en el porcentaje de relleno, a diferencia del largo. En estas dos variables de salida para los casos con mayor porcentaje de relleno la reducción de esas dimensiones es menor que para los casos en los que el porcentaje de relleno es menor.

La orientación de impresión es la variable de entrada con una menor influencia en los resultados, ya que únicamente es significativa en uno de los casos.

Este estudio representa una evaluación inicial de las variaciones experimentadas por piezas fabricadas utilizando filamento con alto contenido en bronce. La caracterización de este material y el análisis de su comportamiento durante el proceso de fabricación son fundamentales para comprender las propiedades mecánicas y dimensionales de las piezas resultantes. A lo largo de la investigación, se identificaron diversos factores que pueden afectar la precisión y calidad de las piezas, en particular en lo que respecta a las contracciones dimensionales tras el proceso de sinterizado.

Además, el estudio se extiende a la evaluación de filamentos que contienen inclusiones de otros materiales metálicos o cerámicos, lo que abre la puerta a una amplia gama de posibilidades para la optimización de las propiedades de los productos fabricados mediante tecnologías avanzadas de impresión 3D, como el MEAM-HP.

Este trabajo sugiere que futuras investigaciones podrían incluir la evaluación de parámetros adicionales, como la temperatura de impresión o las curvas de calentamiento de los tratamientos térmicos, con el fin de optimizar los procesos de fabricación y garantizar la calidad y precisión de las piezas en aplicaciones industriales. Tal enfoque permitirá un mejor entendimiento de cómo los diferentes materiales y parámetros de fabricación interactúan, lo que facilitará la implementación de soluciones más eficientes y rentables en la fabricación de piezas metálicas y cerámicas mediante impresión 3D.

Financiación

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de la convocatoria de proyectos de I+D+i 2023, en el marco del proyecto “Tecnologías 3D aplicadas a la conservación del patrimonio cultural (3DinHerit)” (PID2023-147803OB-I00).

5. Referencias

- [1] Castanon-Jano, L. P.-O.-F. (2024). Enhancing sustainability in polymer 3D printing via fusion filament fabrication through integration of by-products in powder form: mechanical and thermal characterization. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13635-3>.
- [2] Cucinotta, F. D. (2024). A Design Strategy for Removing the Debinding and Sintering Gas in Additive Manufactured Samples of a Bronze/Polylactic Acid Filament. . *Advanced Engineering Materials*, <https://doi.org/10.1002/adem.202301722>.
- [3] Dunham, S. M. (2018). Applications of 3D Printing. *Mater today proc*(<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803917-5.00004-3>), 61–78.
- [4] Jiang, R. C. (2024). Effect of gas flow velocity and multi-laser scanning strategy on surface quality and mechanical properties of 316L parts printed by multi-laser powder bed fusion. . *Optics & Laser Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.112140>.
- [5] Kumar, V. P. (2023). Design and analysis of 3D metal printed SS17-4PH connecting rod. *International Journal On Interactive Design And Manufacturing (IJIDeM)*(<https://doi.org/10.1007/s12008-023-01495-2>), 3287-3304.
- [6] Mohanavel, V. A. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596>.
- [7] Montes-Ramirez, J. E. (2024). Shrinkage and deformation compensation in metal fused filament fabrication (mf3) sintered copper components using 3d scanning and inverse deformation. *Journal Of Manufacturing Processes*, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.069>.
- [8] Rosnitschek, T. S.-L. (2024). Dimensional Accuracy and Mechanical Characterization of Inconel 625 Components in Atomic Diffusion Additive Manufacturing. *Applied Mechanics*(<https://doi.org/10.3390/applmech5020022>).
- [9] Singh, P. M. (2021). A review of study on modeling and simulation of additive manufacturing processes. . *Materials Today Proceedings*, 56(<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.057>), 3594-3603.

- [10] Van Nga Tran, T. L. (2024). The Influence of Printing Materials on Shrinkage Characterization in Metal 3D Printing using Material Extrusion Technology. *Engineering Technology & Applied Science Research*, <https://doi.org/10.48084/etasr.7758>.
- [11] Wei, X. B. (2024). Optimization of extrusion-based additive manufacturing of bronze metal parts using a CuSn10/Polylactic acid composite. *Journal Of Materials Research And Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.111>.
- [12] Wei, X. L. (2024). Optimizing metal part distortion in the material extrusion-thermal debinding-sintering process: An experimental and numerical study. *Heliyon*(<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28899>).
- [13] Zaki, N. M. (2024). The Analysis of the Effect of Printing Orientation Parameter on the Surface Roughness of 3D Metal Printed Specimens. *International Journal Of Nanoelectronics And Materials*.