

Diseño Doehlert multivariable para la optimización de los parámetros de fabricación de piezas de acero inoxidable 17-4 PH obtenidas mediante MEX

Giovanni Gómez-Gras¹, Héctor García de la Torre¹, Kevork Pérez Bustos¹, Maria C. Mera Bastidas¹,
Marco A. Pérez¹

¹Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España.
Email: giovanni.gomez@iqs.url.edu; hectorgarcia@iqs.url.edu; kevork.perez@iqs.url.edu; maria.mera@iqs.url.edu;
marcoantonio.perez@iqs.url.edu

Resumen

La fabricación aditiva de metales (MAM) mediante extrusión de material (MEX) ofrece una solución rentable para producir piezas metálicas a escala industrial. Sin embargo, los ajustes intrínsecos del proceso de extrusión están poco explorados, lo que limita la optimización, especialmente para aleaciones de acero inoxidable. Este trabajo busca optimizar las piezas de acero inoxidable 17-4 PH producidas por MEX utilizando equipos de sobremesa, identificando los parámetros óptimos del proceso. Se empleó un enfoque estadístico robusto, combinando diseños de Taguchi y metodología de superficie de respuesta, para investigar sistemáticamente la influencia de estos parámetros en las propiedades físicas y mecánicas. El diseño de Taguchi evaluó la significancia de los parámetros, y el diseño de Doehlert optimizó las respuestas, resultando en especímenes con mejor adhesión entre capas y menor porosidad. Los experimentos confirmatorios mostraron un rendimiento estático y una dureza mejorados, con un módulo de tracción de 198.2 ± 11.9 GPa, una resistencia a la tracción de 977.2 ± 31.8 MPa y una dureza Vickers de 287 ± 7 HV100.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Extrusión de material, Rendimiento mecánico, Acero inoxidable 17-4 PH.

Abstract

Metal Additive Manufacturing (MAM) via Material Extrusion (MEX) offers a cost-effective solution for producing metal parts at an industrial scale. However, intrinsic manufacturing settings like extrusion process parameters are underexplored, limiting optimization, especially for stainless steel alloys. This work aims to optimize MEX-produced 17-4 PH stainless steel parts using desktop equipment by identifying optimal process parameters. A robust statistical approach, combining Taguchi and Response Surface Methodology designs, systematically investigated the influence of these parameters on physical and mechanical properties. Taguchi's design assessed parameter significance, and a Doehlert design optimized responses, resulting in specimens with improved layer adhesion and reduced porosity. Confirmatory experiments showed superior static performance and hardness, with a tensile modulus of 198.2 ± 11.9 GPa, tensile strength of 977.2 ± 31.8 MPa, and Vickers hardness of 287 ± 7 HV100.

Keywords: Additive manufacturing, Material extrusion, mechanical performance, 17-4 PH stainless steel.

1. Introducción

En los últimos años, la fabricación aditiva (FA) ha evolucionado de la creación de prototipos a la producción de piezas finales, gracias a los avances de las tecnologías y la introducción progresiva de materiales como polímeros, metales, cerámicas y compuestos. En la actualidad es posible producir

componentes funcionales para aplicaciones críticas, desde estructuras aeroespaciales hasta implantes médicos [1]. En la fabricación aditiva de metales (MAM), la extrusión de materiales (MEX) y la sinterización están transformando la producción, permitiendo la fabricación de piezas metálicas con

menor inversión inicial, alta complejidad geométrica y fácil escalabilidad industrial.

La calidad de las piezas MEX depende de la unión entre filamentos, influenciada por el crecimiento del cuello entre rasters y los parámetros de impresión [2]. Para mejorar esta unión, se han explorado técnicas de postprocesado y variaciones en los parámetros de impresión. Los postprocesos, como la deformación superficial y los tratamientos térmicos, mejoran las propiedades mecánicas y físicas de las piezas [3, 4], mientras que la optimización de los parámetros de impresión busca ajustar propiedades del material para aplicaciones específicas [5].

La MAM mediante MEX se ha enfocado principalmente en aleaciones como el acero inoxidable austenítico AISI 316L, con menos atención en el acero inoxidable martensítico 17-4 PH. La comunidad FA ha estudiado cómo los parámetros de impresión afectan propiedades como la densidad, el comportamiento de contracción [6], la anisotropía [7] y el rendimiento mecánico [8]. Sin embargo, los ajustes intrínsecos al proceso de fabricación, como la porosidad y las tensiones residuales, no han sido suficientemente estudiados.

La MEX junto con la sinterización ofrecen oportunidades para mejorar las piezas de acero inoxidable 17-4 PH, pero se requieren ajustes en los parámetros de extrusión. Godec et al. [9] optimizaron parámetros para mejorar las propiedades de tracción en piezas de 17-4 PH, destacando la importancia de la temperatura de la boquilla y el factor de sobreextrusión. Moritzer et al. [10] observaron que ajustar la temperatura de la boquilla y reducir la velocidad de impresión disminuye la porosidad en muestras de AISI 316L, aunque un exceso de temperatura puede degradar térmicamente el material.

Los equipos profesionales limitan la flexibilidad para ajustar los parámetros, mientras que los equipos de sobremesa no alcanzan la calidad de los profesionales. Este trabajo busca maximizar el potencial del material 17-4 PH producido con MEX, optimizando parámetros de extrusión para lograr un rendimiento comparable al de la Fusión de Lecho de Polvo (PBF), un proceso claramente más costoso.

Mediante un enfoque estadístico robusto que combina diseños de Taguchi y de Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), este estudio explora sistemáticamente la influencia del proceso de extrusión y los parámetros de impresión en las propiedades físicas y mecánicas de las muestras fabricadas, identificando la combinación óptima para lograr un comportamiento comparable con el de equipos mucho más costosos utilizando una tecnología más asequible y fácil de usar.

Por tanto, en este estudio se explora la importancia de ajustar con precisión los parámetros de fabricación para conseguir el rendimiento deseado y cumplir los

requisitos estructurales y funcionales esperados. Para lograrlo, se llevan a cabo técnicas de caracterización como ensayos mecánicos de tracción normalizados, evaluación de la dureza y análisis de imágenes de microscopio. Los resultados ofrecen pruebas experimentales exhaustivas que demuestran la viabilidad de producir piezas funcionales de 17-4 PH con un rendimiento equiparable al de tecnologías de elevado coste.

2. Metodología

2.1. Enfoque experimental y análisis estadístico

Los parámetros de proceso seleccionados son: velocidad de impresión, temperatura de la cámara, temperatura de extrusión, factor de sobreextrusión y solapamiento del relleno. Han sido escogidos por su importancia en el proceso de extrusión, y sus intervalos se han determinado mediante un estudio preliminar. Se utilizó un diseño Taguchi para evaluar estos factores y luego se ajustaron los intervalos con el fin de encontrar una combinación óptima. Para dar cabida a posibles ampliaciones del dominio experimental, se eligió un diseño de Doehlert (DD) para la segunda fase de experimentación.

Un diseño ortogonal L_8 de Taguchi evaluó la bondad y variabilidad de estos parámetros de extrusión, identificando los factores clave y sus rangos iniciales. Con los resultados, se definió una matriz experimental DD, resultando en 31 experimentos, repetidos tres veces para estudiar la variabilidad.

Se evaluaron la dureza Vickers (H_v), el módulo de tracción (E), el límite elástico (σ) y la tensión última (σ_{ult}). El análisis con Minitab identificó los parámetros más influyentes y la dirección de la zona óptima. Se utilizó ANOVA para evaluar la significación de los modelos y la presencia de errores sistemáticos.

La proximidad del óptimo se determinó por la falta de ajuste del modelo de segundo orden, y el punto óptimo y su intervalo de predicción se calcularon usando la herramienta de optimización de la superficie de respuesta. Las pruebas de confirmación verificaron la bondad del ajuste del modelo.

2.2. Fabricación de las muestras

Para fabricar las muestras de ensayo se utilizó una impresora 3D Makerbot Method X con filamento BASF Ultrafuse 17-4 PH. Esta impresora mantiene una temperatura constante en la cámara de fabricación, reduciendo el choque térmico y mejorando la calidad final de las piezas. Las muestras se fabricaron con una boquilla de 0.4 mm, un contorno exterior, una altura de capa de 0.1 mm, relleno sólido y ángulo de trama de ± 45 grados. El resto de los parámetros se fijaron según los Diseños de Experimentos.

Las probetas para ensayos de tracción se diseñaron con un grosor nominal de 4 mm, siguiendo las normas ASTM E8M [11], siendo sobredimensionadas para

contrarrestar los efectos de contracción derivados del proceso de desaglomerado y sinterizado (D&S). El desaglomerado se realizó mediante degradación catalítica del aglutinante primario con ácido nítrico gaseoso (HNO_3) en atmósfera de nitrógeno y calor, a $5^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta 600°C , manteniéndose durante 60 min. Las piezas marrones resultantes se sinterizaron bajo presión controlada y temperaturas bajo el punto de fusión en atmósfera de hidrógeno puro para evitar la oxidación, a 1300°C durante 180 min, enfriándose luego pasivamente en el horno.

2.3. Imágenes de microscopía

Para el análisis superficial y transversal de las muestras se utilizó un microscopio digital de alta resolución Olympus DSX1000 equipado con objetivos Olympus MPlanFL N 1x, 5x y 20x. Para preparar las muestras transversales se utilizó el montaje en frío y el pulido refrigerado, garantizando la eliminación de los defectos superficiales causados por el calentamiento o el desgaste mecánico de los métodos de corte convencionales.

2.4. Dureza y ensayos de tracción

Las mediciones de dureza (Hv) se realizaron con el método de indentación Vickers en un durómetro Centaur pb2 según la norma ASTM E92-17 [12]. Se usó un indentador piramidal con una carga de 100 kg (980.7 N) y un tiempo de permanencia de 10 s. Cada valor de dureza es el promedio de cinco indentaciones. Las dimensiones de la indentación se midieron con el microscopio digital Olympus DSX1000 con un objetivo de 5x aumentos.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina Zwick Roell Z030 con un extensómetro MTS Systems 634.12F-54 de 25 mm, siguiendo la norma ASTM E8M [11]. Se usó el método de control C para evaluar el límite elástico, determinado con un desplazamiento de deformación del 0.2%. La velocidad de la cruzeta fue de $0.685 \text{ mm min}^{-1}$. Se presentan resultados de módulo de tracción, tensión de fluencia y tensión última. Los ensayos se realizaron hasta la rotura o hasta alcanzar el valor de tensión máxima.

3. Resultados

3.1. Influencia de los parámetros de extrusión

En primer lugar, se obtuvieron las propiedades de tracción y la dureza Vickers para cada experimento propuesto a partir del diseño L_8 de Taguchi. Cada experimentación se repitió tres veces, como ya se ha anticipado. Las respuestas se procesaron utilizando el software estadístico para extraer el p valor y la contribución de cada factor. Por lo general, los valores p bajos indican el rechazo de la hipótesis nula, ya que existe menos de un 5% de probabilidad de que los resultados salgan al azar y las conclusiones alcanzadas se consideren estadísticamente significativas. Sin

embargo, su magnitud depende en gran medida del tamaño de la muestra.

De estos resultados pueden extraerse varias conclusiones. Distintos factores muestran diversos grados de influencia. La sobreextrusión aparece como un parámetro significativo, especialmente evidente en el módulo de tracción y la tensión última, donde presenta p valores bajos y una contribución porcentual sustancial. Del mismo modo, la temperatura de extrusión influye significativamente en el límite elástico, con un p valor bajo de 0.012 y una contribución porcentual sustancial del 36.36%. En comparación, la temperatura de la cámara, por ejemplo, presenta contribuciones menores que las demás y sigue siendo significativa en la tensión última debido a su beneficio en la unión entre capas. Además, al evaluar la dureza Vickers, el solapamiento del relleno no tiene un efecto notable en su variabilidad, como era de esperar. Esto se debe a que este parámetro no afecta a la configuración del relleno ni a la unión entre capas o dentro de ellas, por lo que no se produce ninguna alteración de la dureza.

Aunque algunos factores muestran una importancia significativa en las distintas variables de respuesta, es importante reconocer la complejidad de sus contribuciones. Por un lado, el análisis ANOVA revela que la velocidad de impresión no tiene una influencia destacable sobre el módulo de tracción o el límite elástico debido a, al menos, uno de los siguientes casos: su valor p calculado es superior a 0.05, o su contribución porcentual sobre esta respuesta es inferior a la contribución del error residual, que también considera las interacciones de segundo orden y es en todos los casos inferior al 8%. Por otro lado, su incremento mejora notablemente la dureza Vickers, sugiriendo su papel en la determinación de las características de dureza del material. Así pues, aunque algunos factores puedan mostrar p valores más altos o contribuciones más bajas, no se puede precisar su papel dentro del diseño experimental.

La Figura 1 muestra detalles de imágenes de microscopía de la unión entre el relleno y los contornos exteriores, mostrando el impacto de variar el factor de sobreextrusión y el solapamiento del relleno. Los resultados indican que los valores más bajos de solapamiento del relleno dan lugar a defectos de unión en los contornos exteriores, lo que afecta al límite elástico y a la resistencia a la tracción debido al aumento de la distancia de solapamiento. Además, un mayor factor de sobreextrusión agrava los defectos de unión, lo que dificulta significativamente el módulo de tracción. Además, las velocidades de impresión más altas suelen mejorar la tensión última y la dureza Vickers.

En consecuencia, esta primera fase experimental sugiere que el mejor resultado es una combinación de mayor velocidad de impresión, temperatura de la

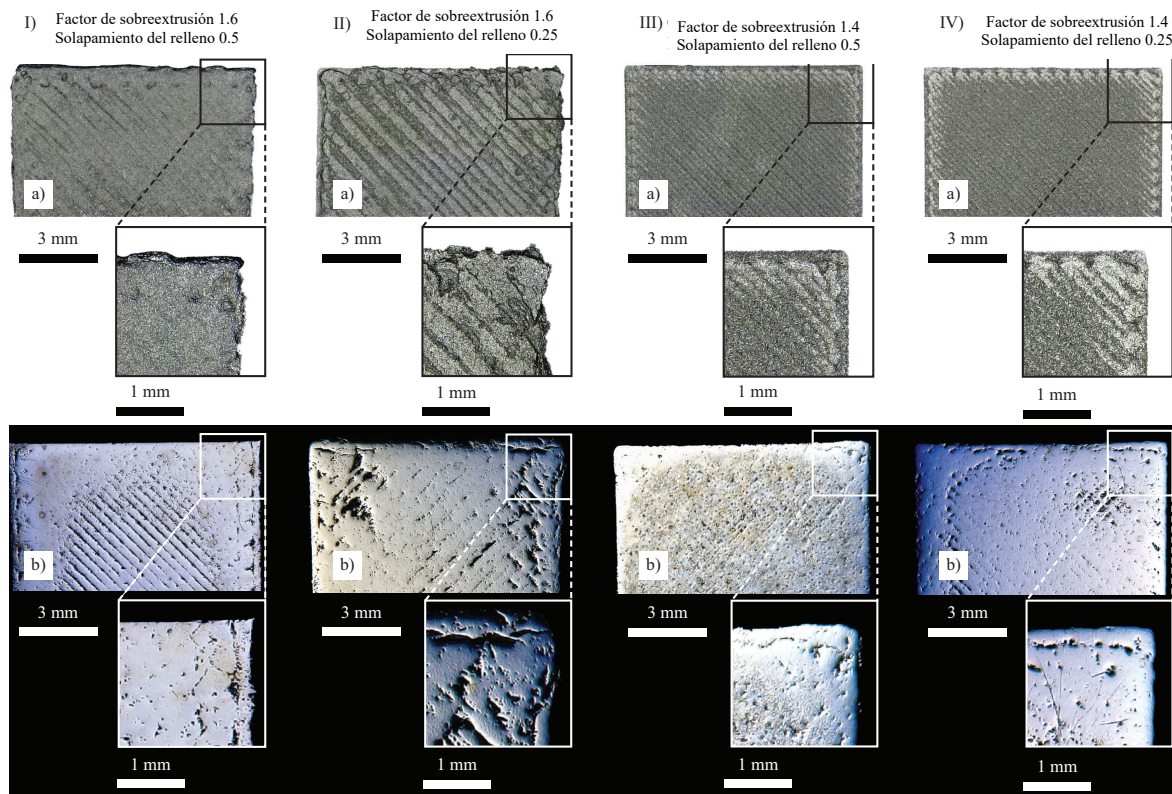


Figura 1. Imágenes de microscopía de la unión del relleno y el contorno al variar el factor de sobreextrusión y el solapamiento del relleno de a) la superficie y b) el interior de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Disposición experimental mediante la matriz ortogonal L_8 de Taguchi, junto con las propiedades de tracción y los resultados de dureza Vickers.

Matriz experimental y resultados para módulo de tracción, límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Vickers del diseño de Taguchi.									
ID	Velocidad de impresión [mm/s]	Temperatura de la cámara [°C]	Temperatura de extrusión [°C]	Factor de sobre - extrusión	Solapamiento del relleno	Módulo a tracción [GPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Resistencia tracción [MPa]	Dureza Vickers
1	5	50	245	1.4	0.25	134.8 ± 2.2	510.4 ± 65.8	568.9 ± 52.4	252 ± 2
2	5	50	245	1.6	0.5	129.5 ± 2.7	530.6 ± 0.9	596.8 ± 15.9	247 ± 1
3	5	95	260	1.4	0.25	139.5 ± 0.1	166.6 ± 39.2	181.4 ± 16.9	265 ± 7
4	5	95	260	1.6	0.5	91.4 ± 10	149 ± 4.3	162.2 ± 16.6	225 ± 7
5	15	50	260	1.4	0.5	141.1 ± 6.7	522.4 ± 3.5	636.6 ± 11.9	276 ± 3
6	15	50	260	1.6	0.25	109.2 ± 13.3	332.1 ± 5.2	363.1 ± 55.7	232 ± 5
7	15	95	245	1.4	0.5	171.5 ± 11.1	590.1 ± 22.5	714.1 ± 15.2	288 ± 4
8	15	95	245	1.6	0.25	102.6 ± 2.9	417.6 ± 1.6	443.7 ± 14.1	262 ± 5

Fuente: Elaboración propia.

cámara y solapamiento del relleno, junto con una menor temperatura de extrusión y un factor de sobreextrusión más bajo, mejorándose así la calidad de

impresión. No obstante, los resultados obtenidos no alcanzaron el rendimiento esperado (véase la Tabla 1), lo que obliga a seguir investigando para ajustar los

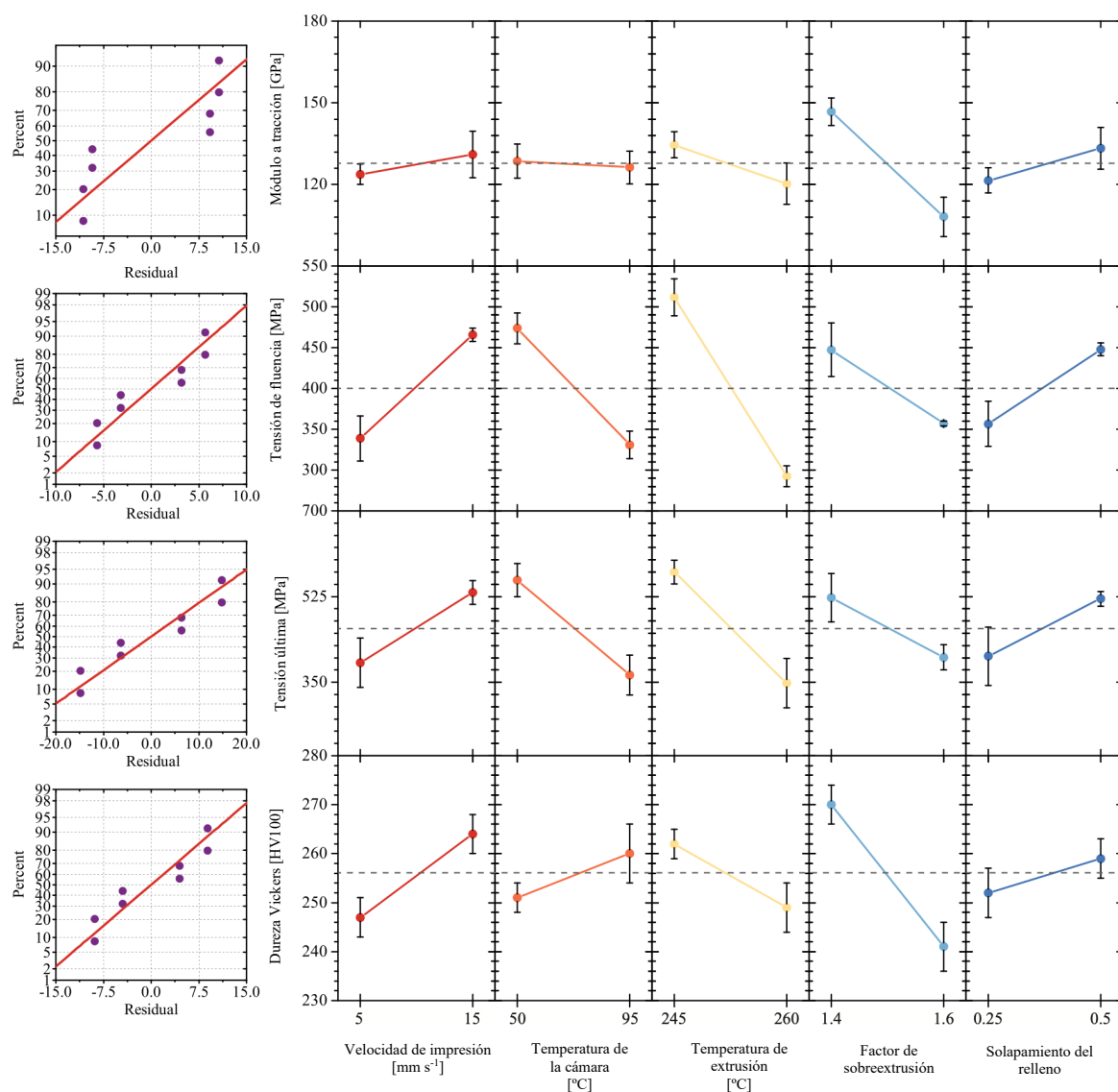


Figura 2. Gráficos de probabilidad normal de los residuos y gráficos de efectos principales de las medias para las respuestas de módulo de tracción, límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Vickers. Fuente: Elaboración propia.

parámetros de impresión con el fin de mejorar las propiedades mecánicas en todas las variables de respuesta.

No obstante, los resultados alcanzados permiten construir gráficos de efectos principales y gráficos de probabilidad normal de los residuos para las cuatro respuestas (véase la Figura 2). Estos gráficos ayudan a evaluar el impacto de un nivel de factor concreto en la respuesta objetivo y verifican la hipótesis de que los residuos tienen una distribución normal sin error sistemático. Los gráficos de efectos principales también incluyen un intervalo de confianza del 95% para la media de cada nivel.

Es importante señalar que los residuos de las cuatro respuestas se distribuyen a lo largo de la línea de probabilidad normal, lo que corrobora la arbitrariedad

del error experimental. Sin embargo, los gráficos muestran un comportamiento especular, lo que sugiere que el modelo puede no ajustar bien con valores atípicos. Es probable que este problema se deba a la naturaleza del diseño de Taguchi, que se ve muy influido por valores atípicos extremos o condiciones inesperadas.

3.2. Diseño de Doehlert y ensayos confirmatorios

Para mejorar el rendimiento mecánico de las piezas de 17-4 PH fabricadas con MEX, se aplicó un diseño Doehlert. En comparación con la primera fase experimental, se observa una menor variabilidad en todas las respuestas, lo que indica una meseta en la mejora. Sin embargo, la rigidez y la tensión última experimentaron mejoras más notables, lo que significa que el aumento de la velocidad de impresión y el

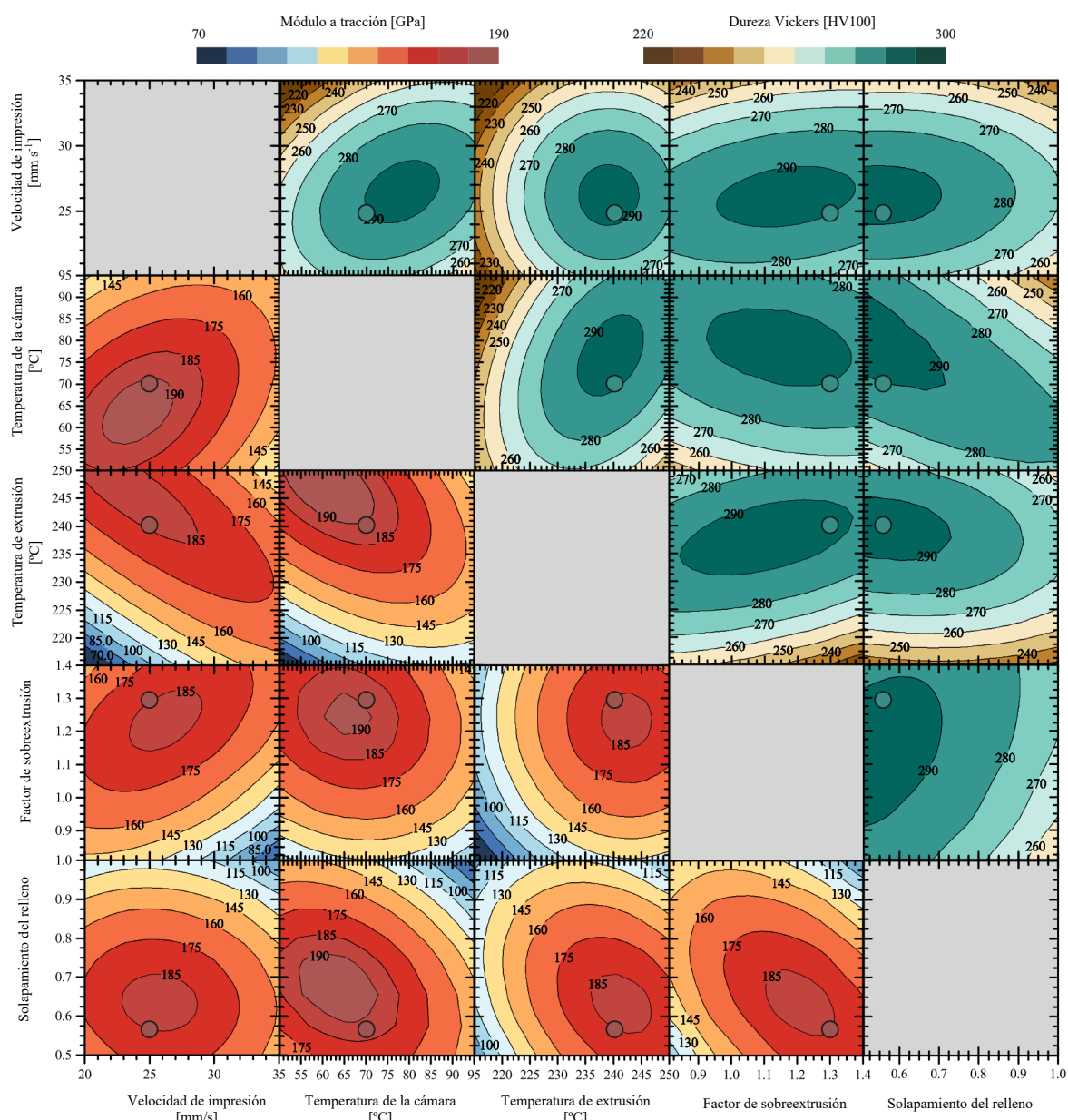


Figura 3. Superficies de respuesta para el módulo de tracción y la dureza Vickers para el diseño experimental Doehlert. En cada gráfico, las probetas ensayadas con la configuración óptima se superponen marcados con su correspondiente escala de colores. Fuente: Elaboración propia.

solapamiento del relleno, junto con la disminución de la temperatura de impresión, son beneficiosos, ya que permiten una unión más fuerte del filamento. A pesar de la disminución de la temperatura de impresión, la impresora dispone de una cámara controlada por temperatura que reduce el choque térmico entre una capa y la anterior, mejorando así la adhesión entre filamentos.

Se analizó el ANOVA del modelo matemático ajustado para cada respuesta a fin de garantizar la ausencia de no heteroscedasticidad o de cambios sistemáticos en la dispersión de los residuos. Considerando un nivel de significación α de 0.05, si el p valor de la prueba de falta de ajuste es superior a α , puede concluirse que el

modelo predicho se ajusta con precisión a los datos, como ocurre con las tres respuestas a ensayos mecánicos. Sin embargo, en el caso de la dureza Vickers, el bajo p valor obtenido no implica necesariamente una falta de ajuste del modelo. Esto puede explicarse por dos posibles causas: La primera se debe a que la prueba F considera la relación entre la falta de ajuste y el error puro, que falla cuando la falta de ajuste es alta o cuando el error puro es bajo, lo que ocurre en el caso de la respuesta de dureza Vickers. El segundo, considera la baja curvatura en la respuesta de dureza Vickers, y el modelo cuadrático no es capaz de evolucionar correctamente y ajustarse a los datos. No obstante, todos los valores p del modelo para las

Tabla 2. Matriz experimental y resultados para módulo de tracción, límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Vickers del diseño de Doehlert.

Matriz experimental y resultados para módulo de tracción, límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Vickers del diseño de Doehlert.									
ID	Velocidad de impresión [mm/s]	Temperatura de la cámara [°C]	Temperatura de extrusión [°C]	Factor de sobre - extrusión	Solapamiento del relleno	Módulo a tracción [GPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Resistencia tracción [MPa]	Dureza Vickers
1	27.5	72.5	232.5	1.1	0.75	182.2 ± 29.3	333.85 ± 17.39	912.34 ± 5.26	294 ± 7
2	35	72.5	232.5	1.1	0.75	163.7 ± 2.7	309.93 ± 5.14	840.98 ± 9.3	288 ± 6
3	31.25	91.985	232.5	1.1	0.75	165.6 ± 11	310.55 ± 12.53	939.22 ± 73.2	292 ± 13
4	23.75	53.015	232.5	1.1	0.75	167.7 ± 13.2	321.04 ± 28.17	886.59 ± 30.23	287 ± 5
5	31.25	53.015	232.5	1.1	0.75	158.1 ± 7.7	297.44 ± 9.7	915.05 ± 12.66	285 ± 17
6	23.75	91.985	232.5	1.1	0.75	147.3 ± 10.9	286.96 ± 20.84	916.01 ± 6.59	267 ± 17
7	20	72.5	232.5	1.1	0.75	145.3 ± 6.6	282.22 ± 1.09	880.17 ± 8.82	282 ± 2
8	31.25	79.0025	246.78	1.1	0.75	148.5 ± 12.9	273.45 ± 10.27	869.19 ± 5.24	261 ± 5
9	23.75	79.0025	246.78	1.1	0.75	160.6 ± 21.5	309.21 ± 34.51	908.83 ± 46.17	276 ± 15
10	27.5	59.5175	246.78	1.1	0.75	182.7 ± 31.5	340.97 ± 55.63	945.34 ± 5.55	266 ± 18
11	31.25	65.9975	218.22	1.1	0.75	167.3 ± 46	310.82 ± 74.53	886.24 ± 52.75	260 ± 7
12	23.75	65.9975	218.22	1.1	0.75	141.5 ± 4.2	270.12 ± 11.31	841.15 ± 26.66	246 ± 10
13	27.5	85.4825	218.22	1.1	0.75	148.1 ± 16.9	283.02 ± 21.68	846.08 ± 6.46	273 ± 14
14	31.25	79.0025	236.07	1.3373	0.75	158.7 ± 3.9	299.53 ± 6.11	853.88 ± 9.47	286 ± 12
15	23.75	65.9975	228.93	0.8627	0.75	154.2 ± 35.2	293.16 ± 55	796.51 ± 56.47	283 ± 11
16	31.25	65.9975	228.93	0.8627	0.75	148.8 ± 2.1	275.3 ± 3.98	862.1 ± 6.73	262 ± 6
17	27.5	85.4825	228.93	0.8627	0.75	164.8 ± 20.5	299.5 ± 20.89	808.98 ± 10.01	288 ± 3
18	27.5	72.5	243.21	0.8627	0.75	152.5 ± 15.2	291.8 ± 23.35	834.41 ± 87.7	258 ± 4
19	23.75	79.0025	236.07	1.3373	0.75	148.2 ± 12.9	287.63 ± 24.98	891.69 ± 8.75	281 ± 7
20	27.5	59.5175	236.07	1.3373	0.75	164.1 ± 3.9	315.88 ± 5.41	943.28 ± 9.23	285 ± 12
21	27.5	72.5	221.79	1.3373	0.75	148.1 ± 12	282.6 ± 7.42	857.69 ± 27.47	280 ± 1
22	31.25	79.0025	236.07	1.1474	0.94375	161.9 ± 4.9	303.24 ± 4.66	893.36 ± 5.38	293 ± 1
23	23.75	65.9975	228.93	1.0526	0.55625	149 ± 6	280.05 ± 8.31	863.72 ± 7.52	273 ± 1
24	31.25	65.9975	228.93	1.0526	0.55625	138.2 ± 21.7	264.99 ± 29.13	865.61 ± 16.16	269 ± 5
25	27.5	85.4825	228.93	1.0526	0.55625	157.8 ± 8	304.39 ± 13.47	955.47 ± 10.54	292 ± 4
26	27.5	72.5	243.21	1.0526	0.55625	192.9 ± 20.1	349.54 ± 23.56	939.37 ± 16.63	297 ± 8
27	27.5	72.5	232.5	1.2896	0.55625	178.5 ± 10.2	337.01 ± 21.94	925.41 ± 22.38	269 ± 4
28	23.75	79.0025	236.07	1.1474	0.94375	149 ± 6.7	281.44 ± 7.36	874.23 ± 4.52	297 ± 18
29	27.5	59.5175	236.07	1.1474	0.94375	156.9 ± 11.6	298.11 ± 20.19	846.63 ± 14.71	297 ± 2
30	27.5	72.5	221.79	1.1474	0.94375	146.9 ± 7.9	271.46 ± 9.6	745.45 ± 35.19	274 ± 4
31	27.5	72.5	232.5	0.9104	0.94375	154.4 ± 5.9	293.3 ± 8.26	880.26 ± 45.8	287 ± 7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Configuración óptima resultante del diseño Doehlert.

Configuración óptima de fabricación	
Parámetro de fabricación	Valor
Velocidad de impresión [mm/s]	24.9
Temperatura de la cámara [°C]	70
Temperatura de extrusión [°C]	240.72
Factor de sobreextrusión	1.299
Solapamiento del relleno	0.556

Fuente: Elaboración propia.

respuestas son inferiores a α , y los altos valores R^2 indican que los modelos ajustados explican con éxito la varianza en todas las respuestas.

La Figura 3 ilustra las representaciones gráficas de contorno de las superficies de respuesta correspondientes a cada modelo matemático junto con los resultados experimentales superpuestos obtenidos con la configuración óptima. En todas las respuestas, las temperaturas de boquilla y los factores de sobreextrusión más elevados, combinados con una mayor distancia de solapamiento del relleno en el contorno exterior, consiguen mejores resultados. La primera contribuye a una mejor adherencia entre capas y dentro de las capas de las piezas finales, lo que permite soportar cargas más elevadas a baja deformación y mejorar la dureza debido al aumento de la cantidad de material extruido por unidad de volumen, de acuerdo con las conclusiones de Godec et al. [8]. Esto último mejora la unión entre el relleno y el contorno exterior, mejorando la cohesión. Además, la disminución de la velocidad de impresión favorece significativamente la rigidez, la resistencia a la tracción y la dureza Vickers. Sin embargo, esta reducción provoca un descenso del límite elástico; a pesar de ello, el análisis ANOVA no informa de la significación estadística del parámetro en esta respuesta, pero sugiere una interacción significativa entre la velocidad de impresión y la temperatura de la boquilla. Por otra parte, el límite elástico depende de la relación entre estos dos parámetros de fabricación, lo que indica que su combinación óptima es crucial para soportar una mayor tensión evitando al mismo tiempo la deformación permanente.

Como se anticipó en la fase experimental inicial, el solapamiento del relleno no afecta a la dureza Vickers. La Figura 3 muestra una tendencia relativamente horizontal al analizar el efecto de este parámetro sobre la dureza, por lo que es posible atribuir toda la varianza al resto de parámetros de fabricación estudiados. En cuanto al efecto de la temperatura de la cámara sobre la tensión última, se observa un punto de silla que se desplaza en función de los parámetros ya comentados. Aunque el modelo sugiere que el máximo parecería situarse más allá de este dominio experimental, no es

técnicamente posible (debido a la tecnología disponible en la actualidad) superar los 95°C y, en caso de bajar la temperatura, el resto de las respuestas se verían comprometidas.

No obstante, dado que todos los parámetros de fabricación tienen un punto de combinación en el que permiten al análisis estadístico alcanzar un óptimo (ver Tabla 1), no se considera realizar una nueva iteración del diseño de Doehlert. Así, el intervalo de predicción obtenido del 95% estima que la muestra en las condiciones óptimas de fabricación debería alcanzar un módulo de tracción de 184.12 ± 50.5 GPa, un límite elástico de 739.8 ± 157.1 MPa, una resistencia a la tracción de 957.4 ± 188.3 MPa, y una dureza Vickers de 293 ± 56 HV100.

Los resultados de los ensayos de confirmación obtenidos tras la fabricación de cinco probetas con los parámetros de impresión óptimos corroboraron la exactitud de las predicciones del intervalo del optimizador, ya que todas las propiedades mecánicas y físicas se encontraban dentro del intervalo previsto, con un módulo de tracción de 198.2 ± 11.9 GPa, un límite elástico de 771.7 ± 21.9 MPa, una resistencia a la tracción de 977.2 ± 31.8 MPa y una dureza Vickers de 287 ± 7 HV100.

3.3. Comportamiento a tracción

La Figura 4 muestra curvas de tensión-deformación representativas de ensayos de tracción, en las que se comparan los resultados obtenidos en la fase inicial de

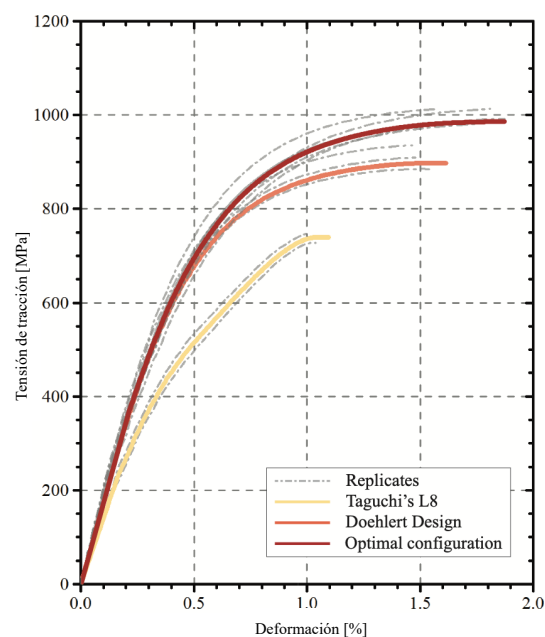


Figura 4. Curvas representativas del ensayo de tracción tensión-deformación de los diseños de experimentos y de la configuración óptima. Fuente: Elaboración propia.

esta investigación con los obtenidos mediante el diseño Doehlert y la respuesta de la configuración óptima. Se observan mejoras significativas en comparación con los resultados de la primera etapa experimental, especialmente en la rigidez, el límite elástico y la resistencia a la tracción, junto con una mayor ductilidad. Este comportamiento puede entenderse examinando las imágenes de la sección transversal de ambos diseños experimentales. El primero reveló una estructura interna más heterogénea, con importantes vacíos presentes tanto en el relleno como en la unión entre capas y contornos exteriores debido a los factores de sobreextrusión y a los valores de solapamiento del relleno (véase la Figura 1). En cambio, el segundo mostró una mejor cohesión y una porosidad homogénea, lo que se tradujo en un mejor rendimiento mecánico. A pesar de esta escasa porosidad, cabe mencionar que el alargamiento a la rotura es inferior al obtenido convencionalmente 17-4 PH y está en consonancia con la bibliografía consultada, sin embargo, estos resultados no alcanzan el 8% de alargamiento máximo esperado.

Esto puede explicarse por la combinación de la presencia y la ausencia de δ -ferrita y austenita retenida, respectivamente. Es bien sabido que la primera es una fase frágil distribuida normalmente a lo largo de los límites de grano y los poros, lo que dificulta la ductilidad del material. La segunda es una formación más flexible, que en una matriz martensítica prefiere precipitar en los límites de grano, ablandando la unión intergranular y aumentando la deformación del material hasta el fallo.

4. Conclusiones

Mediante un enfoque estadístico robusto que combinaba diseños Taguchi y MSR, este estudio exploró la influencia del proceso de extrusión y los parámetros de impresión en las propiedades de muestras de acero inoxidable 17-4 PH. Al centrarse en maximizar el potencial del material producido por MEX con configuraciones óptimas de parámetros disponibles en sistemas de sobremesa, se demostró la viabilidad de conseguir propiedades mecánicas comparables a las producidas por equipos de nivel profesional.

La combinación de diseños Taguchi y MSR permitió identificar la importancia de cada factor y determinar la configuración óptima de los parámetros de impresión: velocidad de impresión de 24.9 mm/s, temperatura de la cámara de 70 °C, temperatura de la boquilla de 240.72 °C, factor de sobreextrusión de 1.299 y solapamiento del relleno de 0.556. Con esta configuración, las muestras de 17-4 PH fueron un 13% más rígidas, lograron un aumento del 25% en su límite elástico y mejoraron un 37% en resistencia a la tracción en comparación con los ensayos preliminares.

El ANOVA reveló que la temperatura de la boquilla influye en todas las respuestas, mejorando la unión de

los filamentos. Mejores resultados se obtienen con temperaturas de boquilla y factores de sobreextrusión más altos, junto con mayor solapamiento del relleno. La interacción entre la velocidad de impresión y la temperatura de la boquilla también es significativa.

Las muestras fabricadas con la configuración óptima alcanzan un rendimiento similar a los resultados comunicados por los fabricantes y demuestran que el acero inoxidable 17-4 PH producido con MEX puede competir con tecnologías de AM más costosas, destacando su potencial para aplicaciones industriales rentables. En comparación con los procesos convencionales, se obtienen menores límites elásticos y resistencias a la tracción, pero una mejora significativa respecto a otros estudios basados en MEX. Este estudio muestra un aumento del 75.02% en el límite elástico y del 97.02% en resistencia a la tracción respecto a otros resultados MEX, y mejoras del 14.75% y 10.10% en comparación con los procesos MIM.

Aunque los valores son un 23.6% y un 12.7% inferiores en comparación con los procesos PBF, indican que se puede alcanzar un rendimiento comparable con una técnica de fabricación más rentable, para un buen número de aplicaciones. Con un mayor perfeccionamiento, la tecnología MEX puede cerrar la brecha de rendimiento con las principales tecnologías de FA a un coste significativamente menor.

Futuros esfuerzos deberían centrarse en cómo estos factores afectan la calidad de la superficie, investigar técnicas de posprocesado y escalar el proceso a geometrías más complejas para liberar todo su potencial.

5. Referencias

- [1] M. Armstrong, H. Mehrabi, N. Naveed, An overview of modern metal additive manufacturing technology, *J. Manuf. Processes* 84 (2022) 1001–1029. Disponible en: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
- [2] A. Basak, A. Lee, A. Pramanik, K. Neubauer, C. Prakash, S. Shankar, Material extrusion additive manufacturing of 17-4 ph stainless steel: effect of process parameters on mechanical properties, *Rapid Prototyping J.* 29 (2023) 1097–1106. Disponible en: 10.1108/RPJ-05-2022-0169.
- [3] H. G. de la Torre, G. Gomez-Gras, A. C. de Bruijn, M. A. Pérez-Martínez, Enhancement of mechanical and surface properties by ball burnishing process on polymeric components obtained by fff, *Rapid Prototyping J.* 29 (2023) 1653–1665. Disponible en: 10.1108/RPJ-12-2022-0424.
- [4] M. Naim, M. Chemkhi, J. Kauffmann, A. Alhussein, Taguchi doe analysis and characterization of 17-4 ph stainless steel parts produced by material extrusion (mex) process, *Adv. Ind. Manuf. Eng.* 8 (2024) 100138. Disponible en: 10.1016/j.aime.2024.100138.

- [5] H. G. de la Torre, M. A. Pérez, G. Gómez-Gras, Tailored mechanical performance of fused filament fabricated 316L steel components through printing parameter optimization, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 128 (2023). Disponible en: [10.1016/j.tafmec.2023.104141](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104141).
- [6] A. Pellegrini, M. G. Guerra, F. Lavecchia, Shrinkage evaluation and geometric accuracy assessment on 17-4 ph samples made by material extrusion additive manufacturing, *J. Manuf. Processes* 109 (2024) 394–406. Disponible en: [10.1016/j.jmapro.2023.12.031](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.031).
- [7] S. O. Obadimu, A. Kasha, K. I. Kourousis, Tensile performance and plastic anisotropy of material extrusion steel 316L: Influence of primary manufacturing parameters, *Addit. Manuf.* 60 (2022). Disponible en: [10.1016/j.addma.2022.103297](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103297).
- [8] A. Kasha, S. O. Obadimu, K. I. Kourousis, Flexural characteristics of material extrusion steel 316L: Influence of manufacturing parameters, *Addit. Manuf. Lett.* 3 (2022) 100087. Disponible en: [10.1016/j.addlet.2022.100087](https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100087).
- [9] D. Godec, S. Cano, C. Holzer, J. Gonzalez-Gutierrez, Optimization of the 3d printing parameters for tensile properties of specimens produced by fused filament fabrication of 17-4ph stainless steel, *Materials* 13 (2020). Disponible en: [10.3390/ma13030774](https://doi.org/10.3390/ma13030774).
- [10] E. Moritzer, C. L. Elsner, C. Schumacher, Investigation of metal-polymer composites manufactured by fused deposition modeling with regard to process parameters, *Polym. Compos.* 42 (2021) 6065–6079. Disponible en: [10.1002/pc.26285](https://doi.org/10.1002/pc.26285).
- [11] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, PA, 2022. Disponible en: https://www.astm.org/e0008_e0008m-22.html.
- [12] ASTM E92-17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, West Conshohocken, PA, 2017. Disponible en: <https://www.astm.org/e0092-17.html>.