



Análisis del comportamiento de la dilatación térmica de muestras Invar 36 PBF-LB con estructura lattice reticular

Maialen Martinez-Aguirre¹, Amaia Calleja-Ochoa¹, Gaizka Gómez Escudero², Jürgen Schreuer², Haizea Gonzalez-Barrio¹, Luis Norberto López de Lacalle Marcaide²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Nieves Cano 12, 01006 Vitoria, España

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Torres Quevedo s/n, 48013 Bilbao, España

³ Departamento de Geociencias, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, Alemania

Este estudio proporciona un análisis experimental del comportamiento del coeficiente de dilatación térmica de la aleación Invar 36 producida mediante fabricación aditiva, en concreto Powder Bed Fusion-Laser Beam (PBF-LB). La aleación Invar 36, conocida por su alta resistencia a la expansión térmica, se utiliza en aplicaciones que experimentan importantes fluctuaciones de temperatura, como es el caso del sector aeronáutico. Además, otro factor crítico en la industria aeroespacial, es el aligeramiento de los componentes. El proceso PBF-LB permite fabricar piezas más ligeras incorporando canales internos o estructuras reticulares, también conocidas como estructuras lattice. Estas técnicas reducen tanto el volumen, como el peso, preservando al mismo tiempo la integridad estructural del material.

Esta investigación no sólo examina la variación del coeficiente de expansión térmica con diferentes geometrías y microestructuras internas, sino que también evalúa el impacto del postmecanizado en las propiedades térmicas y estructurales de la aleación.

1. Introducción

En numerosos sectores industriales, como el aeronáutico o aeroespacial, se pueden encontrar componentes de alto valor añadido, donde el más mínimo cambio dimensional puede comprometer la integridad superficial y generar inestabilidades de funcionamiento. Esto supone un desafío, particularmente relevante, para muchas aplicaciones estructurales de ingeniería como la metrología, la óptica de alta precisión y los componentes láser [1].

Con el fin de buscar alternativas para afrontar dicho desafío, se han desarrollado y aplicado ampliamente los metamateriales multifuncionales, un tipo de metamaterial que exhibe múltiples funciones excepcionales bajo diferentes estímulos o condiciones externas y cuyas propiedades distintivas se derivan principalmente de su microarquitectura más que de su composición [2]. Estos metamateriales son especialmente útiles cuando los dispositivos mecánicos y sensibles a la temperatura se ven sometidos inevitablemente a cargas mecánicas y térmicas acopladas. En este contexto, la alta estabilidad dimensional se vuelve crucial para garantizar un despliegue y repliegue precisos en entornos operativos extremos. Este tipo de materiales, que resisten cambios de temperatura extremos, logra mantener su estabilidad dimensional contribuyendo a reducir el desgaste prematuro de los componentes, alargando su vida útil, y evitando deformaciones indeseadas, las cuales podrían debilitar el componente [3].

Es por esto que un material con un bajo coeficiente de dilatación térmica (CTE) como es el Invar 36, previene distorsiones térmicas no deseadas. El Invar es una aleación, una combinación de níquel y hierro, cuyo nombre proviene de la palabra “invariable”, debido a su mínima expansión o contracción frente a cambios de temperatura [4]. Hoy en día, las aplicaciones del invar son muy variadas. A pesar de que tradicionalmente se utilizaba principalmente en mediciones de precisión, como en péndulos para relojes y termostatos, cada vez son más los sectores que recurren a este material. Entre sus aplicaciones actuales, se incluyen cinescopios de televisión, conductores de cables eléctricos, tanques criogénicos y de gas natural líquido, satélites en órbita y herramientas aeroespaciales [5].

Las aleaciones con estructura austenítica como el Invar presentan dificultades en su mecanizado debido a su alta ductilidad, endurecimiento por deformación y baja conductividad térmica. Sin embargo, gracias al rápido desarrollo de la fabricación aditiva, el proceso PBF-LB (fusionado de cama de polvo con láser) se presenta como una buena alternativa para la fabricación de componentes en Invar 36, ya que presenta bajas tensiones térmicas y pequeñas deformaciones. Los procesos de fabricación aditiva incluyen la minimización del tiempo de fabricación, la reducción del coste total, el peso y la semejanza de las piezas mediante la modificación de la forma del componente y la obtención de una mayor relación resistencia-peso. Sin embargo, la tensión residual y las contracciones son fenómenos críticos en estos procesos [6]. Hasta el momento, solo unos pocos estudios han abordado investigaciones preliminares sobre el Invar 36 fabricado mediante el proceso PBF-LB [7].

Las piezas fabricadas mediante este proceso de fabricación suelen experimentar formación de huecos, grietas internas, cambios metalúrgicos, vaporización de elementos de aleación y formación de tensiones residuales. Es por esto que, [8] contribuye con el estudio de la evolución de las tensiones residuales y las deformaciones de las piezas de Invar 36 mediante un modelo de elementos finitos termomecánico acoplado. Por otro lado, [9] realiza una investigación en la que utilizaron Invar 36 para fabricar muestras mediante esta tecnología, aplicando diversos parámetros de proceso. Los resultados demuestran que las densidades de las muestras superaban el 99,8% en todos los casos. Además, observaron que la porosidad disminuía a medida que aumentaba la potencia del láser, y que el coeficiente de expansión térmica también disminuía junto con la reducción de la densidad relativa. Además, [10] lleva a cabo un estudio paramétrico para investigar la influencia de la velocidad de escaneo láser en la porosidad y el desarrollo microestructural de Invar 36 durante el proceso de PBF-LB, así como la influencia del HIPing y el tratamiento térmico con el objetivo de comprender mejor el comportamiento anisotrópico en muestras fabricadas por PBF-LB. Finalmente, [11] concluye que el proceso de PBF-LB no afecta negativamente a las propiedades de baja dilatación térmica del Invar, sino que produce un coeficiente de dilatación térmica aún más reducido para temperaturas atmosféricas.

La tecnología PBF-LB, permite la fabricación de estructuras ligeras y altamente complejas gracias a su elevado grado de libertad en el diseño. Por lo tanto, se presentan numerosas aplicaciones potenciales para esta tecnología, entre ellas, aplicaciones para el sector aeronáutico. A su vez, Invar 36 también lleva utilizándose en la industria aeronáutica, para aplicaciones que requieren una gran estabilidad dimensional desde 1985 [12].

Esta industria ha experimentado una evolución considerable, convirtiéndose en un sector líder. Pero, para que la industria aeronáutica prospere, es fundamental que la innovación esté en el centro de sus prioridades, lo que incluye la mejora continua de los diseños de los componentes, materiales y conceptos de fabricación, buscando aligerar el peso de los mismos y manteniendo sus propiedades mecánicas [13]. Ante dicha necesidad, se desarrollaron los canales o estructuras reticulares internas, conocidas como estructuras tipo “lattice” debido a sus propiedades, como su ligereza, su elevada resistencia específica y rigidez, su eficiencia térmica y su resistencia a la corrosión. Este tipo de estructuras celulares se definen por sus intrincados detalles, difíciles de reproducir con las técnicas de fabricación convencionales, ya que las propiedades de estas estructuras vienen determinadas por la colocación de

barras en la celda unitaria, el tamaño de ésta y la fracción de volumen ocupada por el material sólido. Estos factores también desempeñan un papel crucial a la hora de definir el peso final de la estructura tipo lattice. La producción de estas estructuras puede llevarse a cabo a través de la fabricación aditiva. [14].

Sin embargo, existe una escasez de estudios que combinen el análisis térmico y el aligeramiento de los componentes mediante las estructuras tipo lattice reticulares en Invar 36. Por lo que se ve una necesidad de realizar dicha investigación, donde no solo se analicen las propiedades mecánicas, sino también el comportamiento inusual de dilatación térmica del Invar 36, dependiendo del método de fabricación y de los procesos posteriores. Además, considerando la principal desventaja del Invar 36; la ductilidad del material y, su escasa maquinabilidad; se detecta una demanda de un estudio anterior y posterior al postprocesado. Los autores ya han llevado a cabo investigaciones previas sobre la influencia del proceso de post-procesado en piezas con estructuras lattice reticulares internas de diferentes orientaciones [15-16].

En este estudio se demuestra que, a pesar de aligerar el material, reduciendo el volumen y el peso mediante las estructuras lattice celulares, e incluso eliminando ciertas paredes de las piezas, las propiedades del material, en cuanto a la expansión térmica, se mantienen incluso después del mecanizado. Para ello, se realiza el diseño de diferentes piezas en Invar 36, con diferentes estructuras lattice, y diferentes volúmenes. Estas piezas se fabrican mediante PBF-LB, y se realiza un análisis de su expansión térmica en una de las direcciones dimensionales.

2. Especificaciones del diseño

Para este estudio, se diseñan 16 muestras de 10x10x10 mm mediante el proceso PBF-LB. Entre ellas, se encuentran 2 muestras sólidas brutas, mientras que las muestras restantes presentan estructuras tipo lattice en su interior. Se distinguen dos tipos de estructuras celulares; uno de los tipos tiene una disposición lineal, mientras que el segundo tipo de estructura es redondeada. Esta diferencia puede apreciarse en la Figura 1.

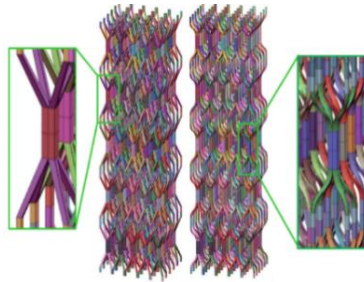


Figura 1. Izquierda) Diseño microestructura lattice lineal. Derecha) Diseño microestructura lattice redonda.

Por otro lado, se introduce otra variabilidad en el diseño de las muestras, ya que algunas cuentan con 6 paredes sólidas exteriores, otras 5, y otras 4, con el objetivo de analizar la influencia de la expansión dimensional en una de las direcciones reduciendo el volumen. También se diseñan las estructuras sin paredes, para estudiar cómo afectan los cambios de temperatura directamente a la estructura lattice. Finalmente, la mitad de estas muestras se someten a un proceso de mecanizado, mientras que la otra mitad no sufre ningún tipo de post-procesado, para evaluar la influencia del mecanizado posterior en las propiedades térmicas y estructurales.

A continuación, en la Tabla 1, se enumeran las 16 muestras con sus características correspondientes.

Tabla 1. Listado de las 16 muestras con sus respectivas características

Nº Muestra	Estructura interna	Mecanizado	Nº paredes
1	Sin estructura - sólida	Si	6
2	Sin estructura - sólida	No	6
3	Lineal	Si	6
4	Lineal	Si	5
5	Lineal	Si	4
6	Lineal	No	6
7	Lineal	No	5
8	Lineal	No	4
9	Lineal	No	-
10	Redonda	Si	6
11	Redonda	Si	5
12	Redonda	Si	4
13	Redonda	No	6
14	Redonda	No	5
15	Redonda	No	4
16	Redonda	No	-

La fabricación de las diferentes muestras de esta investigación se realiza utilizando polvo de Invar 36 como materia prima, también conocido como FeNi36, debido a su baja expansión térmica. Este material es una aleación de níquel y hierro que contiene principalmente hierro y un 36% de níquel, junto con cromo (Cr), manganeso (Mn), cobalto (Co), fósforo (P), carbono (C) y otros elementos. El Invar 36 es especialmente apreciado en aplicaciones que requieren una gran estabilidad dimensional gracias a su extremadamente bajo coeficiente de dilatación térmica (CTE), propiedad atribuida al efecto magneto-estrictivo negativo que caracteriza a esta aleación.

3. Metodología

3.1. Proceso de fabricación de muestras con microestructura interna lattice a través de PBF-LB

Las 16 muestras diseñadas se imprimen mediante el proceso de fabricación aditiva PBF-LB. En concreto, se utiliza la máquina AM400 PBFLB de Renishaw, que funciona en una atmósfera de gas inerte (argón), en este caso, utilizando la opción “Reduced Build Volume” para sistemas de fabricación aditiva. Esta característica de la máquina permite mejorar la precisión y optimizar la producción de componentes más pequeños y de alta precisión. Además, el uso de una atmósfera de argón minimiza la oxidación durante el proceso de fabricación.

Los parámetros de impresión del proceso de PBF-LB para diferentes características se seleccionan teniendo en cuenta el trabajo de investigación previo [16], en el que se formula un diseño factorial completo de experimentos para analizar una amplia gama de diferentes parámetros de proceso con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos para producir componentes densos a partir de Invar 36. Los parámetros de proceso PBF-LB de las muestras impresas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de impresión del proceso PBF-LB

Potencia del láser (W)	Velocidad de escaneo (mm/s)	Espaciado de trazo (mm)	Grosor de capa (mm)	Ancho de franja (mm)	Solapamiento de franja (mm)
350	1250	0,08	0,04	10	0,08

La Figura 2 ofrece una visión general del proceso de impresión. En la parte izquierda de la Figura 2 se muestra el diseño generado con el software Quantam[®], mientras que en la parte derecha de la Figura 2 se muestran las muestras de PBF-LB fabricadas con la máquina Renishaw AM400.

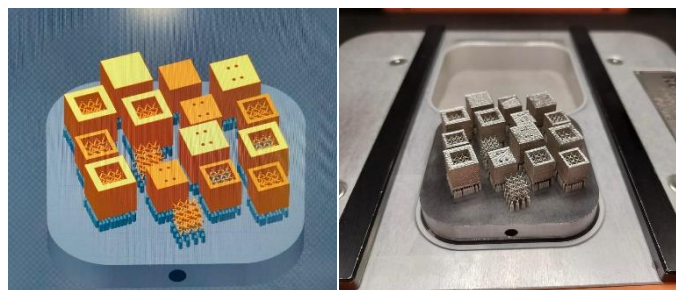


Figura 2. Proceso PBF-LB. Izquierda) Diseño de las muestras. Derecha) Fabricación de las muestras

3.2. Proceso de mecanizado

Las muestras mecanizadas se fabrican utilizando un centro de fresado de cinco ejes Kondia HS1000, controlado numéricamente por Heidenhain iTNC530. Tiene una capacidad de velocidad del husillo de 25.000 rpm y una capacidad de potencia del motor del husillo de 18 KW. En este proceso de mecanizado se utiliza una fresa cuadrada 2.CMC42.A8Z3.800.1 CrazyMill de Mikron Tool con un diámetro de 8mm. Los parámetros de corte se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de corte para el proceso de mecanizado

Velocidad de corte (Vc)	Avance por diente (fz)	Profundidad de corte (ap)
80,424 m/min	0,02 mm/diente	1 mm

La siguiente figura, Figura 3, muestra el proceso de mecanizado realizado en algunas muestras.

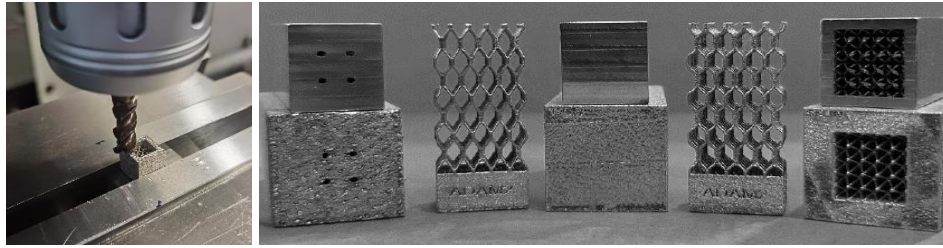


Figura 3. Proceso de mecanizado. Izquierda) Muestra en proceso de mecanizado. Derecha) Comparación muestras mecanizadas y sin mecanizar.

3.3. Proceso de medición de la expansión térmica

Las muestras se miden mediante un dilatómetro inductivo comercial del tipo DIL402C de Netzsch (Selb, Alemania) con el fin de calcular los coeficientes de dilatación térmica obtenidos a partir de las deformaciones inducidas por la temperatura.

El montaje experimental utilizado en el intervalo de temperaturas de 100 K a 673 K consiste en un portamuestras de sílice fundida, termopares de tipo E, un sistema de refrigeración por nitrógeno líquido y un horno con una resistencia calefactora. El dilatómetro se calibra primero con muestras estándar en forma de varilla de diferentes longitudes fabricadas con sílice fundida suministrada por Netzsch. Todos los experimentos se llevan a cabo aplicando velocidades de calentamiento/enfriamiento de 2 K min^{-1} en atmósfera de gas de purga de He a un caudal de unos 2 L/h .

El montaje experimental comienza cuando se presiona suavemente la muestra contra un soporte rígido mediante una varilla de empuje, ambos componentes de sílice fundida. A medida que la muestra sufre una deformación longitudinal inducida por la temperatura, la barra de empuje se mueve hacia delante o hacia atrás. Este movimiento modifica la profundidad de penetración de un núcleo de ferrita en una bobina situada en el extremo opuesto de la varilla de empuje, lo que provoca un cambio en la inductancia de la bobina. La inductancia controla la frecuencia de un oscilador eléctrico, que se mide aproximadamente dos veces por segundo. Este cambio en la frecuencia es directamente proporcional al cambio en la longitud de la muestra, con una resolución de $\pm 1 \text{ nm}$.

En este estudio, el procedimiento de medición comienza con el montaje de una de las muestras Invar 36, para posteriormente realizar la evacuación de la cámara de muestras y el rellenado con gas de purga de helio seco como se muestra en la Figura 4.

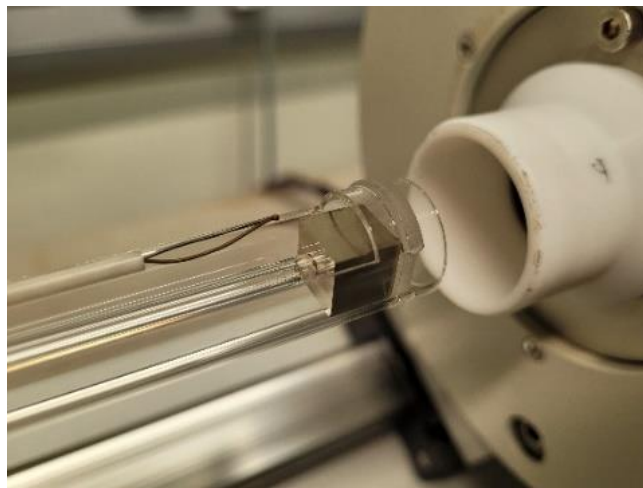


Figura 4. Montaje experimental para el análisis de la dilatación térmica

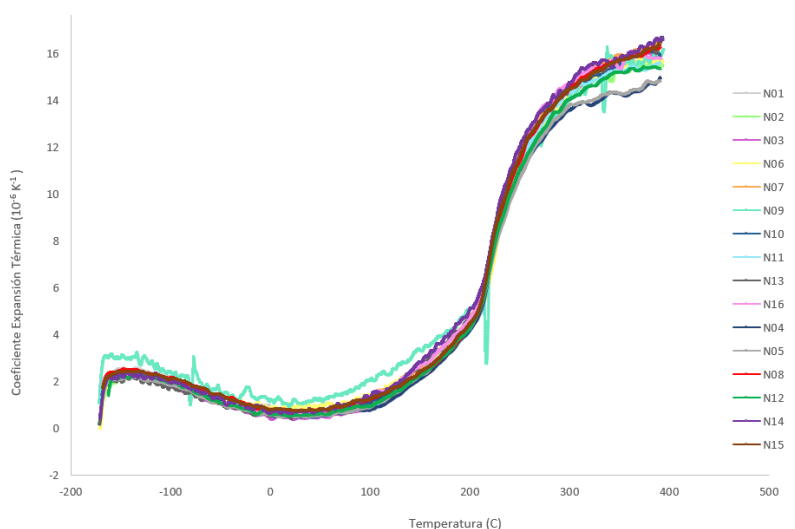
El proceso de medición se divide en siete segmentos distintos, como se indica a continuación en la Tabla 4. El segmento 4 es especialmente importante, ya que abarca todo el intervalo de temperaturas en una sola pasada, mientras que los segmentos restantes se utilizan para identificar cualquier efecto irreversible o espurio.

Tabla 4. Clasificación de los diferentes segmentos considerados en el proceso de medición del CTE

Nº Segmento	Tipo de segmento	Proceso
1	Isotérmico	30 min a 30C → equilibrado
2	Dinámico	Desde 30 C hasta -170C a 2K/min
3	Isotérmico	10 min a -170C
4	Dinámico	Desde -170C hasta +400C a 2K/min
5	Isotérmico	10 min a +400C
6	Dinámico	Desde +400C hasta 30C a 2K/min
7	Isotérmico	30 min a 30C

4. Resultados y Discusión

La aleación Invar 36 es reconocida por su coeficiente de expansión térmica extremadamente bajo, lo que la convierte en un material de interés en aplicaciones que requieren una mínima variación dimensional con los cambios de temperatura. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar en detalle cómo diversas variables, como la geometría de las muestras —en particular, las características de las paredes externas y las microestructuras internas tipo lattice—, así como las variaciones en los procesos de mecanizado posterior, inciden en el comportamiento térmico del material. El enfoque principal radica en estudiar la influencia de estos factores sobre el CTE a través de diferentes rangos de temperatura. Para ofrecer una visión global de los resultados obtenidos, la Figura 5 presenta la curva de expansión térmica en función de la temperatura para las 16 muestras analizadas, permitiendo una comparación directa de cómo las variaciones en la geometría y el proceso de fabricación afectan el comportamiento térmico del Invar 36.

**Figura 5.** Curva CTE en función de la temperatura para las 16 muestras analizadas

En términos generales, todas las muestras analizadas exhiben una tendencia coherente en su comportamiento térmico, presentando resultados muy similares entre sí. Además, es importante señalar que todos los valores obtenidos se encuentran dentro del rango considerado aceptable para aplicaciones prácticas, conforme a los criterios establecidos en la referencia [17]. Esta consistencia en los resultados respalda la fiabilidad del material y su adecuación para su uso en entornos donde el control de la expansión térmica es crucial. No obstante, las muestras que presentan una mayor inestabilidad térmica son aquellas que no cuentan con paredes y están diseñadas exclusivamente con una microestructura tipo lattice, lo que parece comprometer su desempeño frente a variaciones de temperatura. Esta inestabilidad puede estar relacionada con la falta de soporte estructural adicional, lo que influye negativamente en su capacidad para mantener una expansión térmica estable y controlada. En el análisis posterior, se procederá a excluir estas muestras con microestructura lattice exclusiva, concentrándose únicamente en aquellas que presentan una configuración sólida o con paredes, ya que estas ofrecen una mayor estabilidad térmica y son más representativas para los objetivos del estudio.

La Figura 6 presenta cuatro gráficos distintos con el objetivo de facilitar la comparación cuantitativa de los coeficientes de expansión térmica (CTE) obtenidos en los diferentes ensayos previos. Estos gráficos permiten realizar un análisis comparativo detallado de los CTE de las muestras, agrupadas según diferentes configuraciones de paredes, tomando como referencia la muestra sólida para establecer un patrón de comparación.

La clasificación de los gráficos que se muestran en la Figura 6, se ha realizado considerando tanto la geometría específica de cada muestra, como el proceso de mecanizado. En el gráfico a), se muestran los datos obtenidos de las muestras con microestructura lattice lineal que no han sido sometidas a ningún proceso de postprocesado. En este caso, se consideran los valores obtenidos en la muestra N02, como valores de referencia, muestra que corresponde a una muestra sólida sin microestructura y sin mecanizar, y se plasman las diferencias que presentan las muestras N06 (con geometría de 6 paredes), N07 (con geometría de 5 paredes) y N08 (con geometría de 4 paredes) con respecto a ella. Este enfoque facilita una visualización más clara de las variaciones en el comportamiento térmico de las muestras, permitiendo una comparación más precisa. El gráfico b) presenta los resultados de las muestras sin mecanizar que contienen una microestructura lattice redonda, correspondientes a las muestras N13 (6 paredes), N14 (5 paredes) y N15 (4 paredes), en función de la muestra N02. Por otro lado, en el gráfico c), se representan los resultados de las muestras mecanizadas que contienen una microestructura lattice lineal, siendo las muestras N03 (6 paredes), N04 (5 paredes) y N05 (4 paredes), en este caso, en función de la muestra N01, que corresponde a la muestra sólida sin microestructura mecanizada. Finalmente, el gráfico d) muestra los resultados de las muestras mecanizadas con microestructura lattice redonda, correspondientes a las muestras N10 (6 paredes), N11 (5 paredes) y N12 (4 paredes), también en función de la muestra sólida N01.

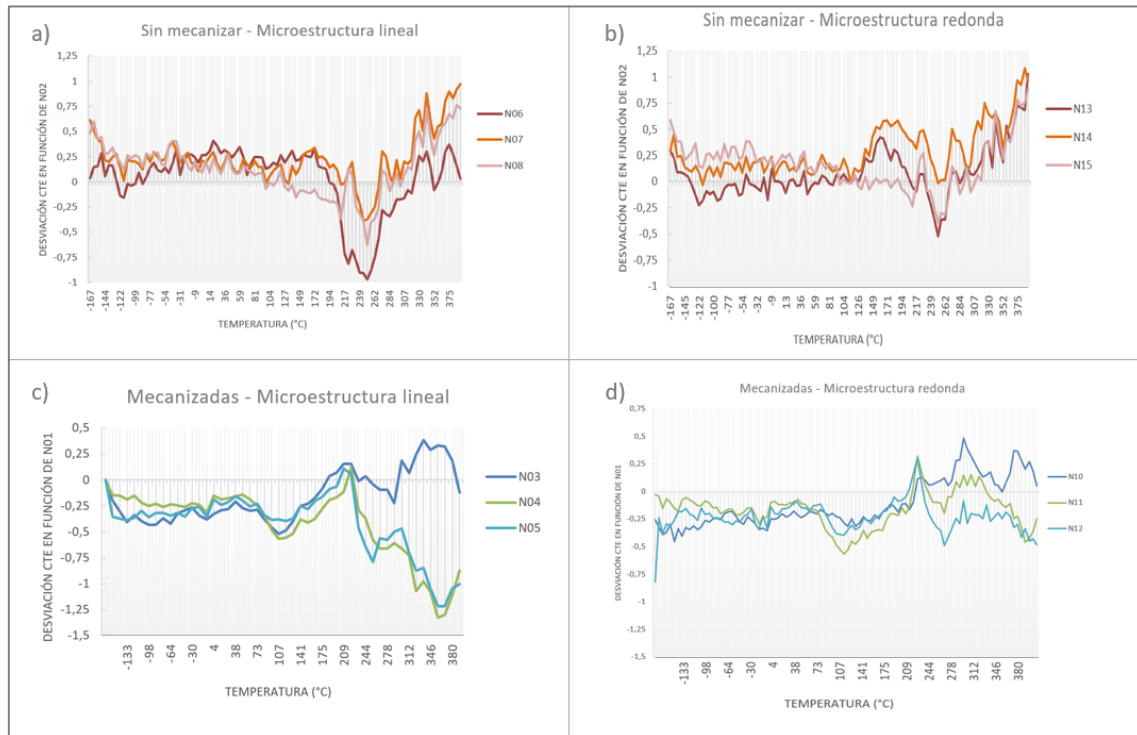


Figura 6. Clasificación análisis CTE. a) muestras sin mecanizar-microestructura lineal. b) muestras sin mecanizar-microestructura redonda. c) muestras mecanizadas-microestructura lineal. d) muestras mecanizadas-microestructura redonda.

En la Tabla 5 se recogen los datos más relevantes obtenidos de estos ensayos de las muestras sin mecanizar. En la tabla, se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos, así como el promedio de la diferencia de CTE de cada muestra en función de N02.

Tabla 5. Valores máximos, mínimos y promedios de las muestras sin mecanizar

	N06	N07	N08	N13	N14	N15
Max	0,41	0,99	0,78	1,02	1,09	0,886
Min	-0,96	-0,39	-0,64	-0,53	-0,06	-0,4
Promedio	0,032	0,24	0,15	0,07	0,39	0,17

Mientras que la Tabla 6, muestra los valores máximos y mínimos obtenidos, así como el promedio de la diferencia de CTE de cada muestra mecanizada en función de N01.

Tabla 6. Valores máximos, mínimos y promedios de las muestras mecanizadas

	N03	N04	N05	N10	N11	N12
Max	0.35	0.12	0.11	0.48	0.32	0.31
Min	-0.52	-1.32	-1.22	-0.45	-0.57	-0.82
Promedio	-0.16	-0.43	-0.43	-0.11	-0.19	-0.23

Este análisis permite evaluar el impacto de la variación de la geometría externa, definida por el número de paredes, y la geometría de la microestructura internas tipo lattice, así como la influencia de las variaciones en los procesos de mecanizado posterior, comparando los resultados con los obtenidos en las muestras sólidas mecanizadas. La interacción entre estos factores permite comprender cómo la estructura de las muestras afecta su comportamiento térmico y a la variabilidad en el coeficiente de expansión térmica.

En lo que respecta a la influencia del número de paredes, las muestras con 6 paredes presentan una diferencia mínima en el CTE respecto a la muestra sólida de referencia, lo que indica que su comportamiento térmico es prácticamente equivalente. Sin embargo, al reducir el número de paredes a 5, se observa un aumento significativo en la diferencia del CTE, lo que sugiere que la eliminación de una pared externa incrementa la expansión térmica de la muestra. En el caso de las muestras con cuatro paredes, si bien el valor del CTE continúa siendo superior al de la muestra sólida, la diferencia es menor en comparación con las muestras de cinco paredes. Esto sugiere que la relación entre el número de paredes y la expansión térmica no es estrictamente lineal, sino que puede estar influenciada por otros factores estructurales y de disipación térmica.

En cuanto al análisis de la influencia del mecanizado, los resultados muestran una clara diferenciación entre las muestras mecanizadas y las no mecanizadas. Las muestras sin mecanizar presentan en su mayoría diferencias de CTE positivas, lo que indica que estas se expanden más que las muestras sólidas de referencia. Por el contrario, en las muestras mecanizadas, todas las diferencias de CTE son negativas, lo que evidencia una menor expansión térmica en comparación con la muestra sólida mecanizada, llegando incluso a presentar cierto grado de contracción térmica.

Finalmente, los gráficos permiten visualizar cómo la interacción entre la microestructura lattice y el proceso de mecanizado influye en los valores del CTE, proporcionando una visión más detallada del impacto combinado de ambos factores en el comportamiento térmico de las muestras. Además, a partir de los datos recogidos en las tablas, se observa que las microestructuras lattice redondas sin mecanizar presentan mayores diferencias de CTE que las estructuras lineales, lo que indica que las estructuras redondas permiten una mayor expansión térmica respecto a la muestra sólida de referencia. Sin embargo, tras el mecanizado, la tendencia se invierte, y las estructuras lineales presentan diferencias de CTE más negativas que las estructuras redondas. Esto sugiere que el mecanizado reduce de manera más pronunciada el CTE en estructuras lineales, lo que podría estar relacionado con una redistribución de tensiones o con una mayor estabilidad dimensional de este tipo de microestructura tras el proceso de mecanizado.

5. Conclusiones

En el presente estudio, se presenta la estrategia del diseño y fabricación mediante PBF-LB de diferentes piezas en Invar 36, con diferentes microestructuras lattice, y diferentes volúmenes que posteriormente se mecanizan, de forma que se muestra un enfoque interesante para desarrollar piezas que requieren una gran estabilidad dimensional. La investigación se ha centrado en la influencia de la geometría externa, determinada por el número de paredes, así como en la disposición de la microestructura interna tipo lattice, y en los efectos del mecanizado sobre el coeficiente de expansión térmica (CTE). De acuerdo con la medición de los coeficientes de expansión térmica, se recopilan las siguientes conclusiones:

1. El número de paredes afecta directamente en la estabilidad térmica de las muestras. Las muestras con más paredes tienen un CTE más cercano a la referencia sólida, mientras que reducir las paredes aumenta la expansión térmica.
2. El mecanizado muestra una tendencia clara a la reducción del CTE en comparación con las muestras sin mecanizar, llegando incluso a inducir contracción térmica en algunos casos. Este comportamiento indica que la eliminación de material y la posible redistribución de tensiones residuales generadas durante el proceso de fabricación aditiva afectan directamente la respuesta térmica del material.
3. Las microestructuras lattice redondas sin mecanizar presentan mayores diferencias de CTE en comparación con las lineales, lo que sugiere una mayor susceptibilidad a la expansión térmica. Sin embargo, tras el mecanizado, las estructuras lineales experimentan una reducción más significativa del CTE que las estructuras redondas, lo que indica que la eliminación de material y el ajuste dimensional afectan en mayor medida a este tipo de configuración interna.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Gobierno Vasco, por el apoyo a los grupos de investigación universitarios, IT1573-22, a través de la convocatoria ELKARTEK con el proyecto KK-2024/00095 financiada por el Departamento de Industria, Transición Energética y Sostenibilidad del Gobierno Vasco, y la convocatoria PUE_2024_1_0003 financiada por el Departamento de Educación del Gobierno Vasco. También agradecen a la convocatoria PID2023-146640NB-I00 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y cofinanciada por la Unión Europea.

Además, esta publicación es parte del Proyecto de investigación PLEC2024-011247 financiado por MICIU/AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Por último, los autores agradecen a CERATIZIT por su colaboración para la realización de este trabajo.

7. Referencias

- [1] Akgul, B., Kul, M., Erden, F., “The puzzling thermal expansion behavior of invar alloys: a review on process-structure-property relationship”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 49, No. 2, 254-307, (2023) <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2170975>
- [2] Zhang, Y., Liang, Y., Liu, S., Wang, B., “A new design for enhanced stiffness of dual-constituent triangular lattice metamaterial with unbounded thermal expansion”, *Materials Research Express*, vol. 6, No. 1, 015705. (2018). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae5be>
- [3] Zhou, Y., Yang, Q., Wei, K., “Additively manufactured multi-functional metamaterials: low coefficient of thermal expansion and programmable Poisson’s ratio”, *Virtual And Physical Prototyping*, vol. 19, No. 1, (2024) <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2303714>
- [4] Davis J.R., “Alloying. Understanding the basics”, *ASM International*. (2001). ISBN: 0-87170-744-6
- [5] Liu, H., Sun, Z., Wang, G., Sun, X., Li, J., Xue, F., Peng, H., Zhang, Y., “Effect of aging on microstructures and properties of Mo-alloyed Fe–36Ni invar alloy”, *Materials Science And Engineering A*, vol. 654, 107-112. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.018>
- [6] Sefene, E. M., “State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review”, *Journal Of Manufacturing Systems*, vol. 63, 250-274, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>
- [7] Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Yang, X., Xie, H., Qu, Z., Fang, D., “Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 772, 138799. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138799>
- [8] Yakout M., Elbestawi M.A., “Residual Stress Formation in Laser-Based Powder Bed Fusion (PBF-LB) of Invar 36”, *ASTM International*, vol. 1631, 34-44, (2019). <https://doi.org/10.1520/STP163120190149>
- [9] Asgari H., Salarian M., Ma H., Olubamiji A., Vlasea M., “On thermal expansion behavior of invar alloy fabricated by modulated laser powder bed fusion”, *Materials & Design*, vol. 160, 895-905, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.025>
- [10] Qiu, C., Adkins, N. J., Attallah, M. M., “Selective laser melting of Invar 36: Microstructure and properties”, *Acta Materialia*, vol. 103, 382-395, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.020>
- [11] Harrison, N. J., Todd, I., Mumtaz, K. “Thermal expansion coefficients in Invar processed by selective laser melting”, *Journal Of Materials Science*, vol. 52, No. 17, 10517-10525, (2017). <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1169-4>
- [12] Yakout, M., Cadamuro, A., Elbestawi, M. A., Veldhuis, S. C. “The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys”, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, 2081-2098, (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0280-7>
- [13] Martínez-Aguirre, M., Gómez, G., Bo, P., Barton M., González-Barrio H., Calleja-Ochoa A., López de Lacalle L. N., “Design, motion-planning, and manufacturing of custom-shaped tools for five-axis super abrasive machining of a turbomachinery blade type component”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 133, 655–669, (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13774-7>
- [14] Barrio, H. G., Ochoa, A. C., Escudero, G. G., Mishra, S., Martínez-Aguirre, M., Mentxaka, A. L., De Lacalle, L. N. L., Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) for Cellular Structures Formed by a Heterogeneous Skeleton. *Key Engineering Materials*, vol. 958, 149-156. (2023). <https://doi.org/10.4028/p-j1vury>
- [15] Martínez-Aguirre, M., Kumar, S., Gómez, G., Holgado, I., González-Barrio, H., Calleja-Ochoa, A., De Lacalle, L. N., “Analysis of thin-walled components with internal microstructure design manufactured by lpbF”, *MM Science Journal*, vol. 4, (2023). https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_11_2023103
- [16] González-Barrio, H., Calleja-Ochoa, A., Gómez, G., Mishra, S., Martínez-Aguirre, M., Lamikiz A., López de Lacalle L. N., “Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) for Cellular Structures formed by a heterogeneous skeleton”, *Key Engineering Materials*, vol. 958, 149-156, (2023). <https://doi.org/10.4028/p-j1vury>
- [17] Yang, Q., Wei, K., Yang, X., Xie, H., Qu, Z., Fang, D., “Microstructures and unique low thermal expansion of Invar 36 alloy fabricated by selective laser melting”, *Materials Characterization*, vol 166, 110409, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110409>