

2019/20

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

CONTRADEFORMADA

Evaluación y reducción de las deformaciones en piezas de fabricación aditiva mediante el concepto de **contradeformada**.

Nº Expte: IMDEEA/2019/32

Programa: PROYECTOS DE I+D EN COOPERACIÓN CON EMPRESAS

RESULTADOS DEL PROYECTO

Realizado por:
AIDIMME



*Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020*

AIDIMME
2019/20



Contenido

OBJETIVOS.....	4
ACTIVIDADES DESARROLLADAS.....	4
CONCLUSIONES.....	33

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Piezas fabricadas con MJF en poliamida 12</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2. Piezas fabricadas con EBM en cobre puro</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Piezas fabricadas con EBM en Titanio</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4. Piezas fabricadas con LPBF en Titanio</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 5. Piezas fabricadas con SLA en resina Next</i>	<i>16</i>

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Plan de trabajo proyecto CONTRADEFORMADA</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Esquema actividades técnicas del proyecto</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Ejemplo de localización de las triadas diseñadas, tanto lateral como la central</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4. Patrón diseñado para EBM. Medidas en mm</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5. Localización e identificación de los patrones en las tecnologías EBM y MJF.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6. Diseño pieza FAST para digitalizado.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 7. Pieza conjunto de voladizos. Las caras en rojo en las que se evalúa la deformación.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8. Diferentes localizaciones y orientaciones de la pieza conjunto de voladizos</i>	<i>9</i>
<i>Figura 9. Diseño de la pieza para hacer el diseño de la contradeformada.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 10. Conjunto de piezas de MJF para evaluación de deformaciones en función de la localización y orientación.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 11. Muestra para el desarrollo de parámetros</i>	<i>10</i>
<i>Figura 12. Diseño de soporte para el diseño de la contradeformada.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 13. Representación de las piezas fabricadas en poliamida 12 mediante la tecnología MJF</i>	<i>12</i>
<i>Figura 14. Representación de las piezas fabricadas en cobre con la tecnología EBM.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 15. Representación de las piezas fabricadas en Titanio con la tecnología EBM</i>	<i>14</i>
<i>Figura 16. Representación de las piezas fabricadas en Titanio con la tecnología LPBF</i>	<i>15</i>
<i>Figura 17. Representación de las piezas fabricadas en resina NeXt con la tecnología SLA.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 18. Ejemplo de los resultados obtenidos de las triadas de Titanio</i>	<i>18</i>
<i>Figura 19. Patrones de medición</i>	<i>18</i>
<i>Figura 20. Desviación del diámetro interior de todas las bandejas de fabricación para el cobre procesado por EBM.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 21. Pieza enviada a digitalizar.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 23. Malla resultado del digitalizado por los diferentes sistemas de digitalizado.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 23. Piezas voladizo fabricadas.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 24. Medidas teóricas y localización de las pletinas en la bandeja de fabricación de MJF.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 25. PLETINAS. Resultados de las bandejas 43, 45 y 47 en función de la orientación de la pieza (horizontal, vertical o inclinada).....</i>	<i>22</i>

<i>Figura 26. Resultados de las desviación de las piezas de cobre</i>	<i>23</i>
<i>Figura 27. Probetas de calibración</i>	<i>25</i>
<i>Figura 28. Diseño de la pieza voladizos para hacer el diseño de la contradeformada (PIEZA 1).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 29. Diseño de soporte (PIEZA 2).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 30. Resultados de la medición de las probetas de calibración</i>	<i>27</i>
<i>Figura 31. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 1</i>	<i>27</i>
<i>Figura 32. Ficheros resultantes de la primera simulación. Cálculo mecánico pieza 1</i>	<i>28</i>
<i>Figura 33. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2</i>	<i>28</i>
<i>Figura 34. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2 con tratamiento térmico de AIDIMME</i>	<i>29</i>
<i>Figura 40. Resultados de simulación. Cálculo termo-mecánico pieza 2 con tratamiento térmico de AIDIMME</i>	<i>29</i>
<i>Figura 36. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2 con 12 copias apiladas</i>	<i>29</i>
<i>Figura 37. Resultados de la simulación. Cálculo termo-mecánico pieza 2 con 12 copias apiladas</i>	<i>30</i>
<i>Figura 38. Resultados de la simulación realizada con el software 2</i>	<i>30</i>
<i>Figura 39. Fabricación 1: Probetas de calibración y pieza de voladizos</i>	<i>31</i>
<i>Figura 40. Fabricación 2: Detalle pieza contradeformada</i>	<i>31</i>

PROYECTO CONTRADEFORMADA

Evaluación y reducción de las deformaciones en piezas de fabricación aditiva mediante el concepto de contradeformada.

OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto CONTRADEFORMADA es determinar el método o proceso que debe utilizarse para conseguir eliminar o atenuar la deformación que se produce en los procesos de fabricación aditiva. Para la consecución del objetivo principal del proyecto, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Identificación y evaluación de las deformaciones de piezas fabricadas con diferentes tecnologías de fabricación aditiva y con diferentes materiales.
2. Evaluación de software capaz de generar ficheros de contradeformada.
3. Evaluación de las deformaciones tras la fabricación de la contradeformada de las piezas.
4. Análisis de los métodos de verificación dimensional más adecuados para las piezas de fabricación aditiva.

ACTIVIDADES DESARROLLADAS

El proyecto consta de 5 paquetes de trabajo, un paquete de trabajo de gestión y coordinación, otro de difusión, otro de transferencia y dos paquetes de trabajo técnico. A continuación se muestra un esquema del plan de trabajo.

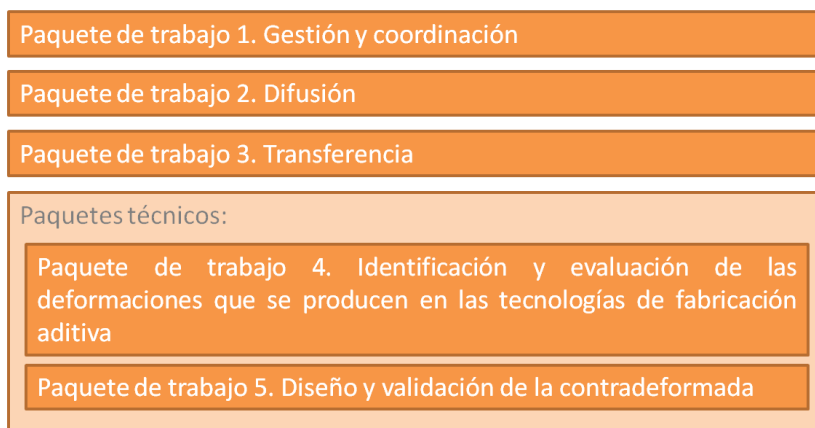


Figura 1. Plan de trabajo proyecto CONTRADEFORMADA



A continuación se muestran las actividades realizadas en los paquetes de trabajo técnico. El siguiente esquema sintetiza el trabajo técnico desarrollado del proyecto contraformada.

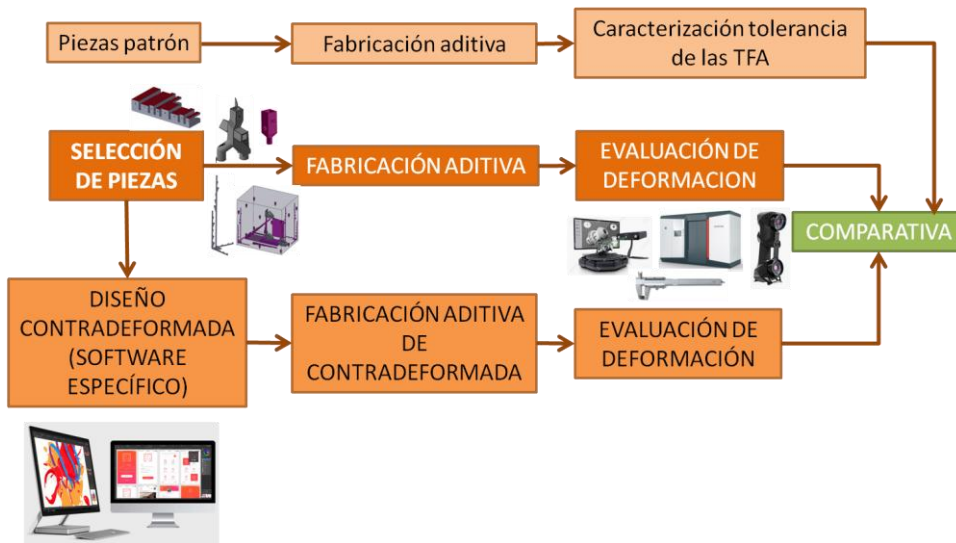


Figura 2. Esquema actividades técnicas del proyecto

PAQUETE DE TRABAJO 4. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Para la consecución de los resultados ha sido necesario desarrollar las siguientes tareas:

1. Definición y selección de piezas susceptibles a la deformación
2. Fabricación de las piezas en diferentes tecnologías, materiales y condiciones
3. Evaluación dimensional de las deformaciones

Tarea 4.1 Definición y selección de piezas susceptibles a la deformación

Cada tipología de proceso de fabricación aditiva tiene unas características específicas que afectan a la deformación, depende principalmente del material a procesar así como del propio proceso de fusión por capas, en concreto la fuente de calor responsable de la fusión como de las condiciones de cámara de construcción. Por este motivo, algunas de las piezas diseñadas son para todas las tecnologías consideradas y otras exclusivamente para un tipo de tecnología.

Principalmente las tecnologías de fabricación aditiva que se han contemplado en el proyecto son aquellas disponibles en AIDIMME, sobre todo aquellas más utilizadas por las empresas de la Comunidad Valenciana como aquellas de última incorporación en las instalaciones de AIDIMME. Las principales tecnologías consideradas han sido:

- Multijet Fusión (MJF) de HP, tecnología de fabricación de última generación mediante la que se procesan polímeros, en concreto se han fabricado piezas en Poliamida 12.

- Estereolitografía (SLA). La más antigua de las tecnologías de fabricación aditiva con gran calidad y muy utilizada en el desarrollo de prototipos. Las piezas se han fabricado en resina NeXT.
- Electron Beam Melting (EBM). Tecnología de fusión en lecho de polvo mediante un chorro de electrones. Las piezas se han fabricado en titanio y cobre.
- Fusión en lecho de polvo por láser (LPBF). Las piezas han sido fabricada en titanio.

Para cada una de las problemáticas a analizar se ha diseñado un tipo de pieza específica con el fin de estudiar dichas problemáticas de la forma más correcta posible.

Además estas piezas han sido fabricadas varias veces en diferentes fabricaciones con el fin de evaluar la repetitividad del proceso, así como la evaluación de la repetitividad de los resultados en diversas localizaciones. Piezas seleccionadas:

1. Triada

Para la evaluación de la deformación que ocurre en las tecnologías de lecho de polvo, sobre todo en la dirección Z o lo que es lo mismo en la dirección de crecimiento de la pieza, se han diseñado unas piezas, denominadas triadas, con diferentes zonas donde medir las cotas X, Y, Z. En el caso de cota Z existen más zonas de medición dada la mayor problemática en dicha cota. Además se han diseñado dos variantes de las triadas para colocarlas en diferentes zonas de la bandeja o volumen de fabricación y así evaluar si hay diferencias entre dos localizaciones diferentes, una lateral y otra central. En la triada central solamente se evalúa las cotas en Z, se ha diseñado así para que se puedan incluir otras piezas en las fabricaciones.

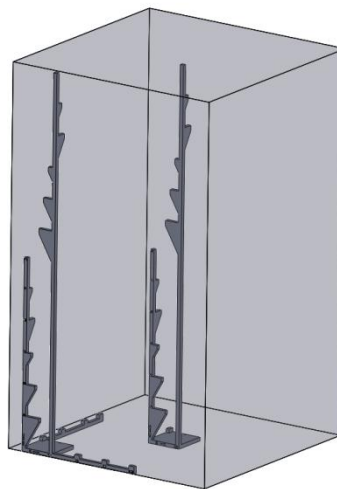


Figura 3. Ejemplo de localización de las triadas diseñadas, tanto lateral como la central

2. Patrones

Se ha definido una pieza sencilla a través de la cual hacer un estudio de tolerancias de fabricación para las diferentes tecnologías y materiales procesados por las mismas. Se ha desarrollado el estudio de tolerancias de fabricación para estas tecnologías:

- Multijet Fusion (MJF) de HP para el procesamiento de poliamida 12

- Electron Beam Melting (EBM) para el procesado de cobre
- Electron Beam Melting (EBM) para el procesado de titanio

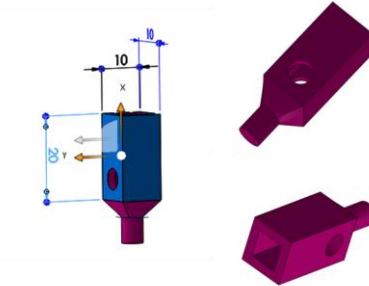


Figura 4. Patrón diseñado para EBM. Medidas en mm

Estas piezas patrón se han colocado en zonas concretas y perfectamente identificadas en el volumen de fabricación y se ha repetido su fabricación en varias ocasiones (el número de patrones y de repeticiones ha dependido de la tecnología). De este modo se ha evaluado la repetitividad de las medidas obtenidas así como la dispersión o uniformidad de resultados en función de la localización de las mismas independientemente de donde está situados los patrones,

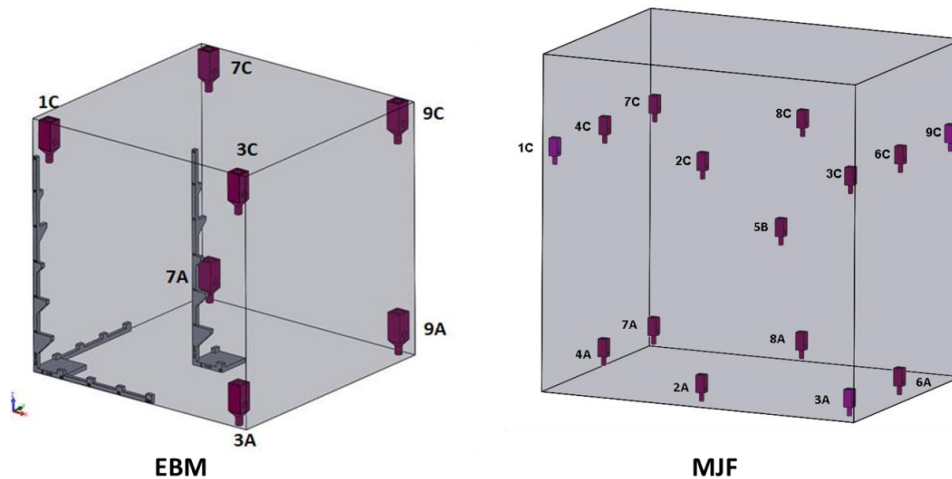


Figura 5. Localización e identificación de los patrones en las tecnologías EBM y MJF

3. Pieza diseño FAST para evaluar diferentes medios de digitalización.

La pieza seleccionada para la evaluación de los diferentes medios de digitalizado ha sido una pieza que se diseñó durante el proyecto FAST (LINEAS ESTRATEGICAS I+D 2019 con nº de expediente IMAMCC/2019/1), esta pieza posee diferentes características y pequeños detalles que nos permiten verificar si el sistema de digitalizado es capaz de captar todas esas características. Esta pieza se ha fabricado en poliamida 12 con la tecnología MJF.

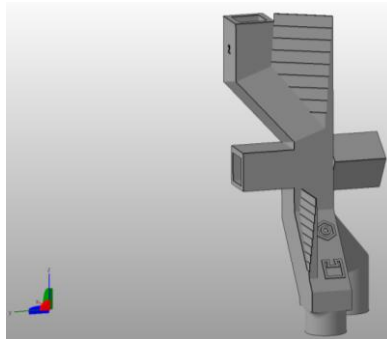


Figura 6. Diseño pieza FAST para digitalizado

4. Conjunto de voladizos para evaluación de deformaciones

Esta pieza se ha diseñado con el fin de validar la deformación de las caras rojas (ver figura siguiente) en diferentes tecnologías. Además se ha fabricado esta pieza en diferentes orientaciones y posiciones dentro del volumen de fabricación con el fin de realizar comparaciones y comprobar si las desviaciones existentes dependen de esta variable. Se han fabricado en las siguientes tecnologías:

- Electron Beam Melting (EBM) para el procesado de cobre
- Electron Beam Melting (EBM) para el procesado de titanio
- Multijet Fusion (MJF) de HP para el procesado de poliamida 12
- Estereolitografía (SLA) para el procesado de resina Somos®Next

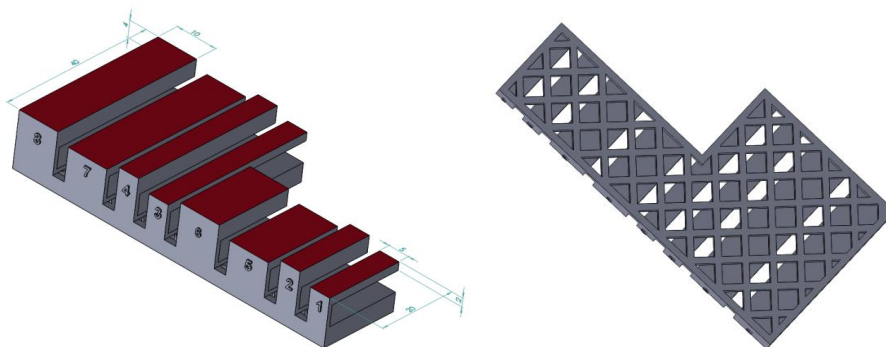


Figura 7. Pieza conjunto de voladizos. Las caras en rojo en las que se evalúa la deformación

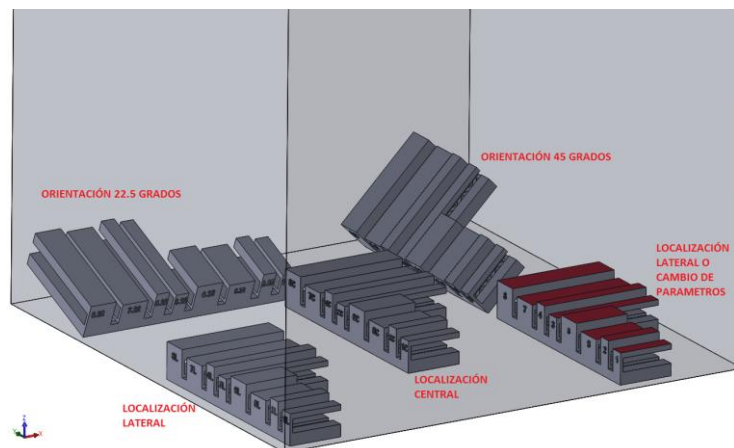


Figura 8. Diferentes localizaciones y orientaciones de la pieza conjunto de voladizos

5. Conjunto de voladizos para el análisis de diseño de contradeformada

Para realizar el primer diseño de contradeformada, se ha considerado la misma pieza definida anteriormente pero con una modificación en la zona de abajo, eliminando la rejilla para facilitar la simulación y el cálculo de la contradeformada.

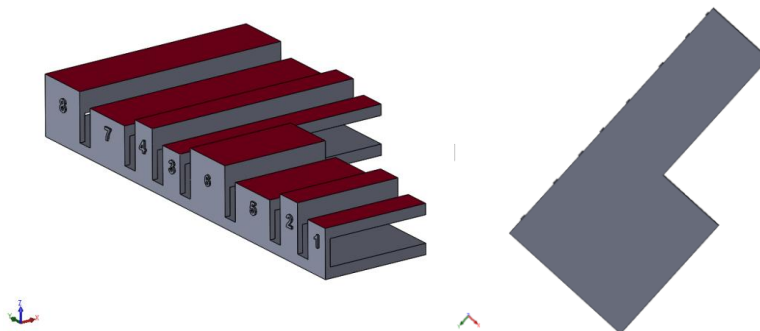


Figura 9. Diseño de la pieza para hacer el diseño de la contradeformada

6. Conjunto de piezas de MJF para evaluar las deformaciones de dicha tecnología.

Se ha definido un conjunto de piezas simples, ubicadas en diferentes localizaciones así como en distintas orientaciones dentro del volumen de fabricación y se han repetido en tres ocasiones con el fin de estudiar de qué dependen las deformaciones y las pequeñas diferencias entre las dimensiones que se obtienen.

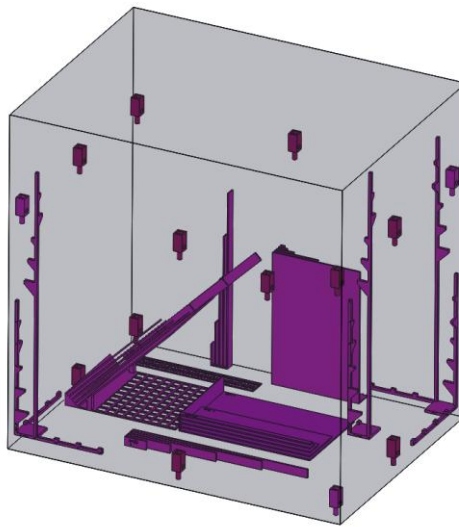


Figura 10. Conjunto de piezas de MJF para evaluación de deformaciones en función de la localización y orientación

7. Piezas reales de cobre.

Para la evaluación de las deformaciones de cobre, se ha optado por evaluar piezas reales con geometrías tubulares y fabricadas con la tecnología EBM en cobre puro. Además se han evaluado 9 probetas con diferentes parámetros de fabricación, así es posible conocer si hay diferencias importantes en función de los parámetros de fabricación. Estas probetas se han fabricado en una aleación basada en cobre de la que no se disponía de parámetros de fabricación.

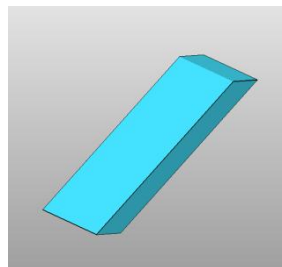


Figura 11. Muestra para el desarrollo de parámetros

8. Diseño de un soporte para el diseño de la contradeformada

Se ha seleccionado un soporte que se diseñó y optimizó en el proyecto SKIN, proyecto desarrollado durante el año 2017 con el número de expediente IMDEEA/2017/133. Se ha seleccionado esta pieza por la cantidad de opciones que tiene para su localización y orientación en la placa de fabricación así como por su geometría que da pie a la deformación. De este modo se evalúa la validez del proceso de diseño de una pieza de fabricación aditiva y el diseño de contradeformada con una pieza real. Además se ha utilizado esta pieza para evaluar diferentes opciones que permite el software de simulación de fabricación aditiva como

es la aplicación virtual de tratamientos térmicos para aliviar tensiones, como la realización de diferentes tipo de cálculos (cálculo a través de probetas de calibración o cálculos termomecánicos) así como analizar la posibilidad de apilar piezas en la bandeja de fabricación para aumentar el número de piezas que caben en una bandeja de fabricación lo que permite directamente una reducción en el coste y tiempo de fabricación de una pieza.



Figura 12. Diseño de soporte para el diseño de la contradeformada

Tarea 4.2. Fabricación de las piezas en diferentes tecnologías, materiales y condiciones

Tras la definición de todas las piezas, se fabricaron cada una de ellas siguiendo las indicaciones de localización y orientación en el caso que los tuvieran indicados. Se han fabricado las siguientes piezas:

- Multijet Fusion (MJF) de HP en Poliamida 12.
- Estereolitografía (SLA) en resina NeXT.
- Electron Beam Melting (EBM) en titanio y cobre.
- Fusión en lecho de polvo por láser (LPBF) en titanio.



Tabla 1. Piezas fabricadas con MJF en poliamida 12

TECNOLOGÍA MULTIJET FUSION - POLIAMIDA 12					Conjunto de piezas de MJF para evaluar deformaciones	
BANDEJAS DE FABRICACIÓN	Triadas	Patrones	Conjunto voladizos	Pieza diseño FAST para digitalizar	Pletinas	Patrones
43	3	15	0	0	3	15
45	0	7	0	0	3	7
47	3	15	0	0	3	15
68	1	14	0	0	0	14
78	0	0	5	0	0	0
80	0	0	0	6	0	0
82	3	0	0	0	0	0
TOTAL PIEZAS FABRICADAS: 177						



Figura 13. Representación de las piezas fabricadas en poliamida 12 mediante la tecnología MJF

Tabla 2. Piezas fabricadas con EBM en cobre puro

ELECTRON BEAM MELTING - COBRE					
BANDEJAS DE FABRICACIÓN	Triadas	Patrones	Conjunto voladizos	Piezas reales	Muestras de desarrollo de parámetros
286	0	7	0		
287	2	7	0		
289	2	7	0		
291	1	7	0		
292	2	7	0		
308	0	0	5		
Otras bandejas				4	9
TOTAL PIEZAS FABRICADAS: 60					



Figura 14. Representación de las piezas fabricadas en cobre con la tecnología EBM

Tabla 3. Piezas fabricadas con EBM en Titanio

ELECTRON BEAM MELTING - TITANIO			
BANDEJAS DE FABRICACIÓN	Triadas	Patrones	Conjunto voladizos
129	2	7	0
134	2	7	0
135	2	7	0
136	2	7	0
137	2	7	5
TOTAL PIEZAS FABRICADAS: 50			



Figura 15. Representación de las piezas fabricadas en Titanio con la tecnología EBM

Tabla 4. Piezas fabricadas con LPBF en Titanio

FUSION DE LECHO DE POLVO POR LASER - TITANIO		
BANDEJAS DE FABRICACIÓN	Probetas calibración del software	Conjunto voladizos
1	3	1
2		1
TOTAL PIEZAS FABRICADAS: 5		

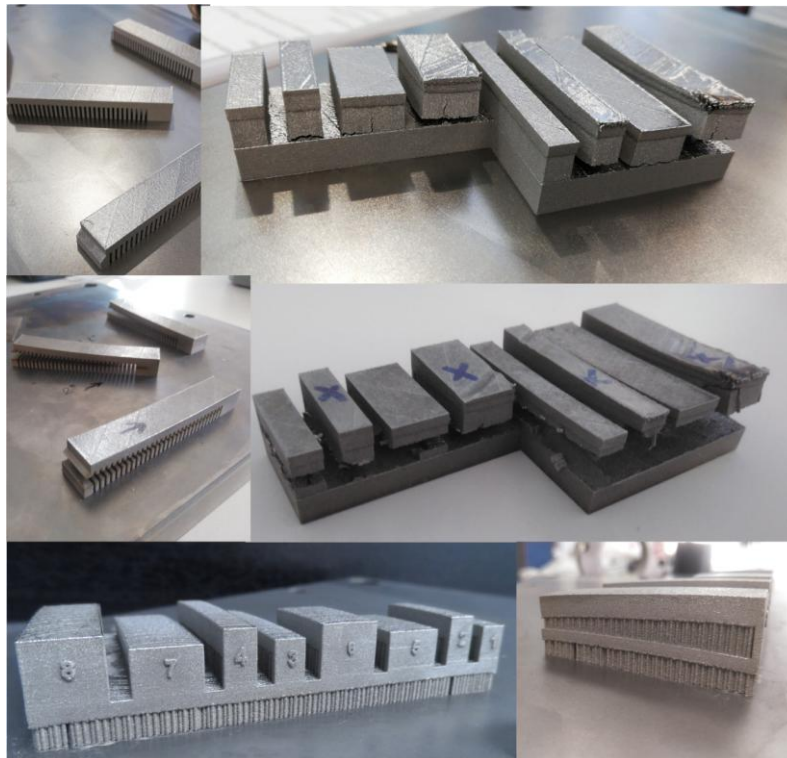


Figura 16. Representación de las piezas fabricadas en Titanio con la tecnología LPBF

Tabla 5. Piezas fabricadas con SLA en resina Next

ESTEREOLITOGRAFÍA - RESINA NEXT	
BANDEJAS DE FABRICACIÓN	Conjunto voladizos
1	5
TOTAL PIEZAS FABRICADAS: 5	

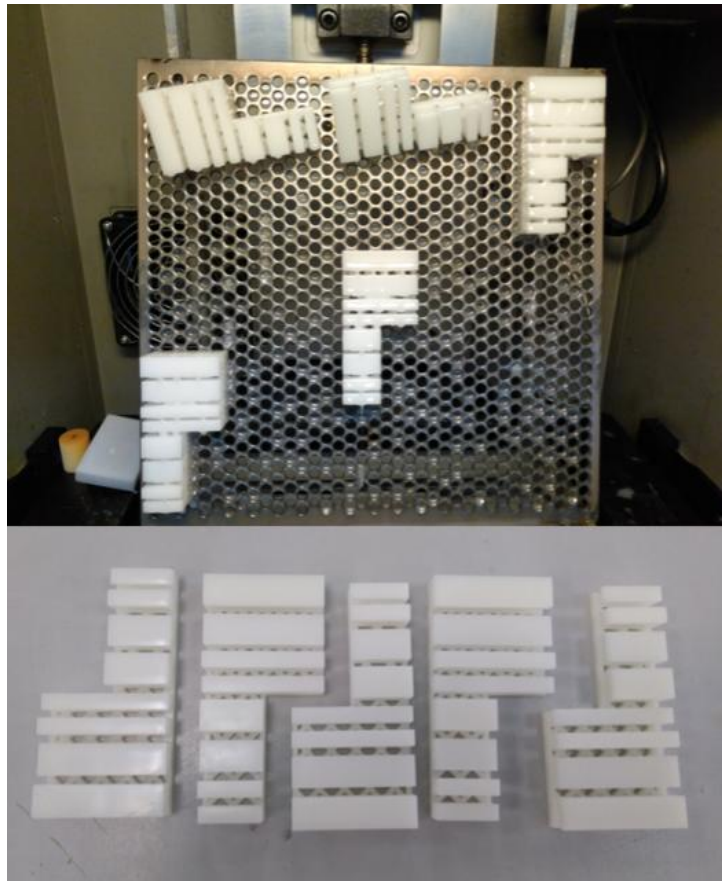


Figura 17. Representación de las piezas fabricadas en resina NeXt con la tecnología SLA

Tarea 4.3 Evaluación dimensional de las deformaciones.

Existen varios métodos para la verificación dimensional de piezas, por una parte mediante una máquina medidora de tres coordenadas, equipo ya establecido en la industria con el que se obtienen tolerancias dimensionales y geométricas muy estrechas. El uso de esta tecnología se complica cuando las piezas a medir tienen geometrías muy complejas como las que se obtienen con las tecnologías de fabricación aditiva. Para este tipo de piezas complejas los escáneres 3D y la tomografía computerizada son medios adecuados para un análisis de las deformaciones.

Para el análisis de tolerancias dimensionales y geométricas se han realizado las mediciones de las piezas patrón mediante una máquina medidora de tres coordenadas.

Con respecto a los escáneres 3D, éstos capturan un objeto, la información se transfiere a un programa de modelado 3D. Una vez preparado el modelo es posible exportar el archivo para hacer la comparativa con respecto al modelo original así como disponer de un modelo 3D nuevo para hacer cálculos, etc... sobre ese modelo escaneado, es posible mediante un software específico, realizar también medidas de zonas o detalles críticos de las piezas.

La selección de un tipo de escáner debe tener en cuenta los siguientes factores: El campo de aplicación, el tipo de objeto, las dimensiones/distancia respecto al objeto, superficie del objeto (alguno de los sistemas tienen problemas con superficies reflectantes o transparentes) y la resolución (en este caso los escáneres de contacto son los más precisos).

Para realizar una comparativa de varios escáneres identificados se ha digitalizado una pieza de poliamida 12 en varios sistemas con el fin de evaluar las virtudes y deficiencias de cada uno de ellos para la digitalización de este tipo de piezas.

Con respecto a la tomografía computerizada o CT Scan, tiene una ventaja con respecto a los anteriores sistemas y es que además de digitalizar la pieza exteriormente también la analiza interiormente, por lo tanto es posible determinar zonas internas así como detectar defectos internos.

La evaluación de las triadas tanto en Titanio, cobre y poliamida 12 se ha realizado mediante la medición directa con un pie de rey digital.

A continuación se muestra como ejemplo alguna de las mediciones realizadas.

- Medición de las triadas para evaluar las desviaciones en x,y, z para piezas de cobre y titanio procesados por la tecnología EBM y poliamida 12 procesado por MJF

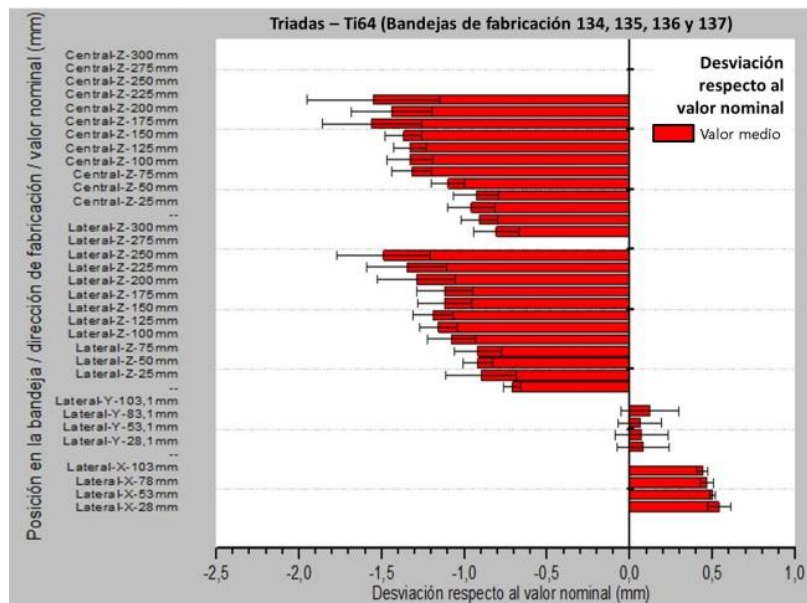


Figura 18. Ejemplo de los resultados obtenidos de las triadas de Titanio

- Medición de las piezas patrón para la obtención de tolerancias dimensionales y geométricas de las tecnologías de fabricación aditiva

Se muestran los resultados obtenidos en cobre. Se han evaluado diferentes características de las piezas patrón de cobre de cada una de las bandejas de fabricación.



- Diámetro exterior del cilindro
- Diámetro interior del agujero
- Distancia entre elementos (longitud del elemento)
- Errores de redondez (Circularidad)
- Errores de concentricidad
- Errores de perpendicularidad
- Errores de paralelismo
- Errores de planitud

Figura 19. Patrones de medición

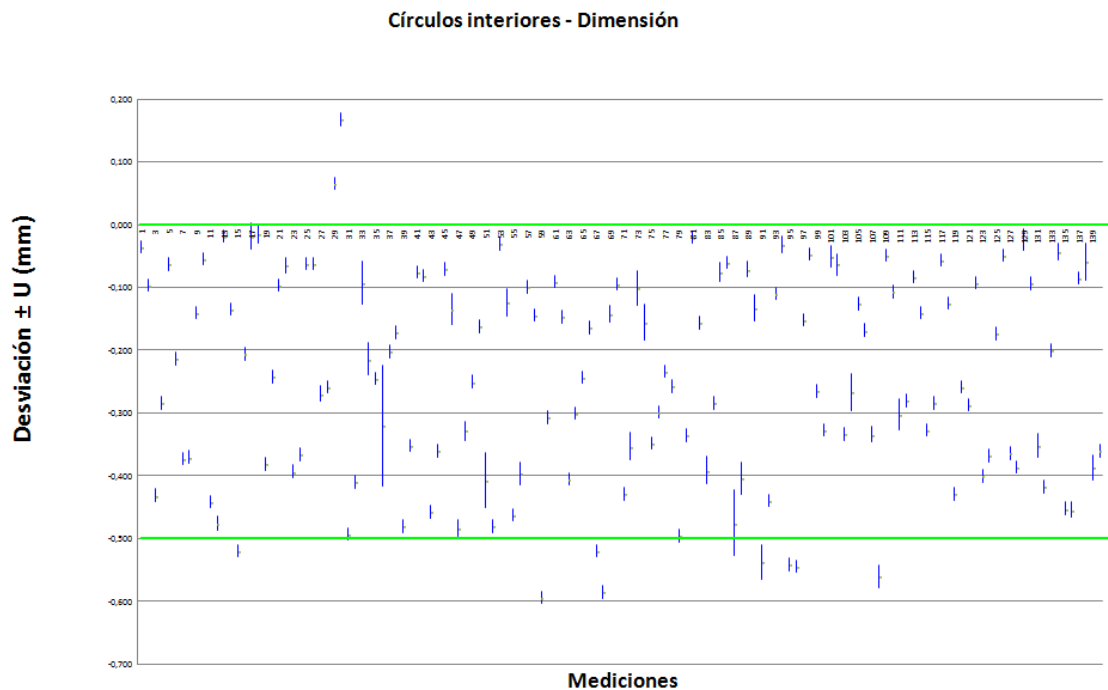


Figura 20. Desviación del diámetro interior de todas las bandejas de fabricación para el cobre procesado por EBM

Se puede observar que para los cilindros exteriores, el 50% de las muestras tienen desviaciones positivas y el 50% desviaciones negativas. Obteniendo un valor que englobe todas las desviaciones se puede concluir que en el caso del cobre los cilindros exteriores tienen una desviación o lo que es lo mismo una tolerancia de fabricación de -0.150 a 0.1 mm.

- Digitalizado de geometrías – Escaneado 3d

La pieza demo, fabricada en poliamida 12 con la tecnología MJF se ha enviado a diferentes escáneres de digitalizado con el fin de comparar las medidas obtenidas y el modo de operar de cada uno de ellos. Se fabricaron varias muestras en la misma bandeja de fabricación para que las condiciones de fabricación fuesen las mismas:

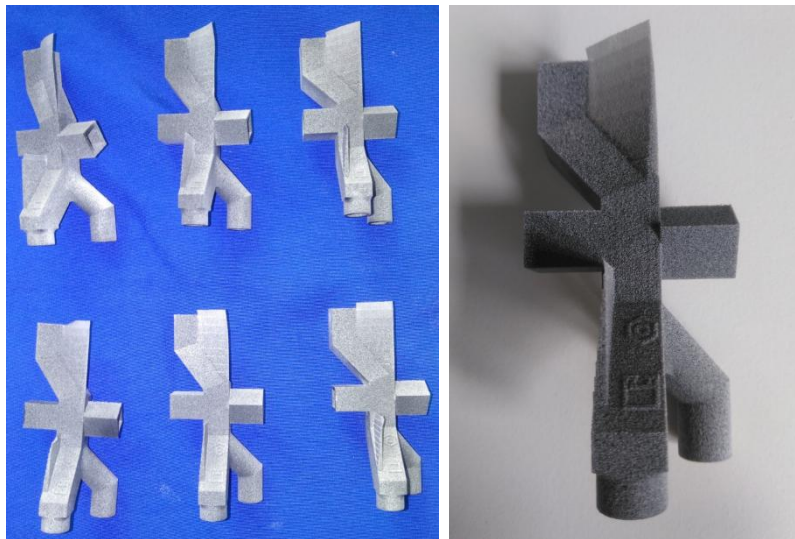


Figura 21. Pieza enviada a digitalizar

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el escaneado/digitalizado de las piezas por los distintos sistemas, así como una imagen de la malla que se ha obtenido y que se ha comparado con el CAD original.

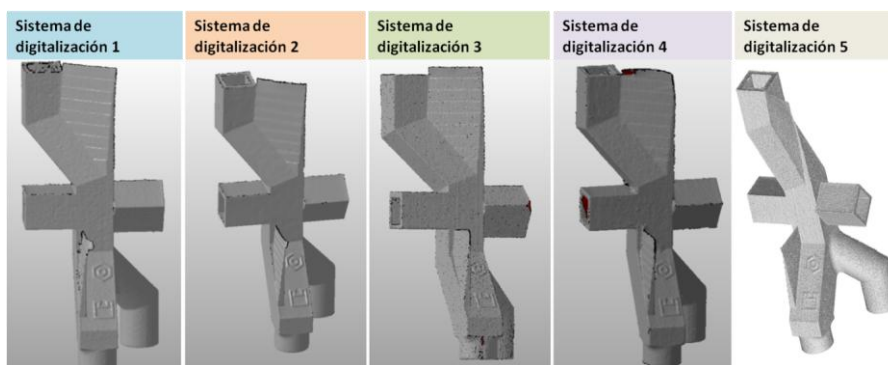


Figura 22. Malla resultado del digitalizado por los diferentes sistemas de digitalizado

En general la desviación de la pieza con respecto al CAD se encuentra entre ± 0.06 mm, aunque se han detectado zonas concretas cuya desviación es mayor llegando a ± 0.2 mm ya que hay una gran deformación en las zonas finas de los espesores.

Dada la geometría de la pieza y la calidad de los acabados de la tecnología MJF, el proceso de alineación de superficies a partir del cual se evalúa la diferencia dimensional entre una superficie teórica y la real, ha sido más sencillo y por lo tanto los resultados pueden ser comparativos sin tener que hacer más pruebas de alineación.

Con respecto a la medida de espesores, más que el digitalizado la importancia para la medición de algunos detalles críticos de una pieza depende del software con el que se trata la malla como resultado de la digitalización. Además cabe destacar que la pieza seleccionada para el

desarrollo de esta actividad tenía espesores muy finos que incluso se deformaron cuando se limpiaron las piezas tras su fabricación.

- Evaluación dimensional en función de la posición y orientación de las piezas en la bandeja de fabricación mediante la pieza conjunto de voladizos



Figura 23. Piezas voladizo fabricadas

A continuación se muestra algunos de los resultados obtenidos:

- En el caso del titanio fabricado con tecnología EBM, las orientaciones a cierto ángulo (tanto 22.5° como 45°) presentan menor desviación en todas las muestras independientemente de los valores de los voladizos.

- Con respecto a las muestras orientadas a 0° , se obtiene menos desviación en la zona lateral del volumen de fabricación que en el centro del mismo.

- Las tecnologías de metal necesitan soportes para evacuar el calor que se produce durante el proceso de fusión. Al quitar este soporte la pieza tiende a elevarse por lo tanto las desviaciones son positivas. En el caso del polímero las desviaciones son negativas como consecuencia de la gravedad. En el caso de la EBM las orientaciones inclinadas presentan menor desviación de las que se fabrican a 0° .

- Con respecto a las dimensiones del voladizo, en general son menores las desviaciones para los voladizos con menor longitud, destacando de todos los casos el voladizo 5: con longitud 20 mm, grosor 2 mm y ancho de 10 mm. En la medida de lo posible hay que evitar geometrías muy alargadas y finas.

- Evaluación de las desviaciones dimensionales y deformaciones de la tecnología MJF.



Figura 24. Medidas teóricas y localización de las pletinas en la bandeja de fabricación de MJF

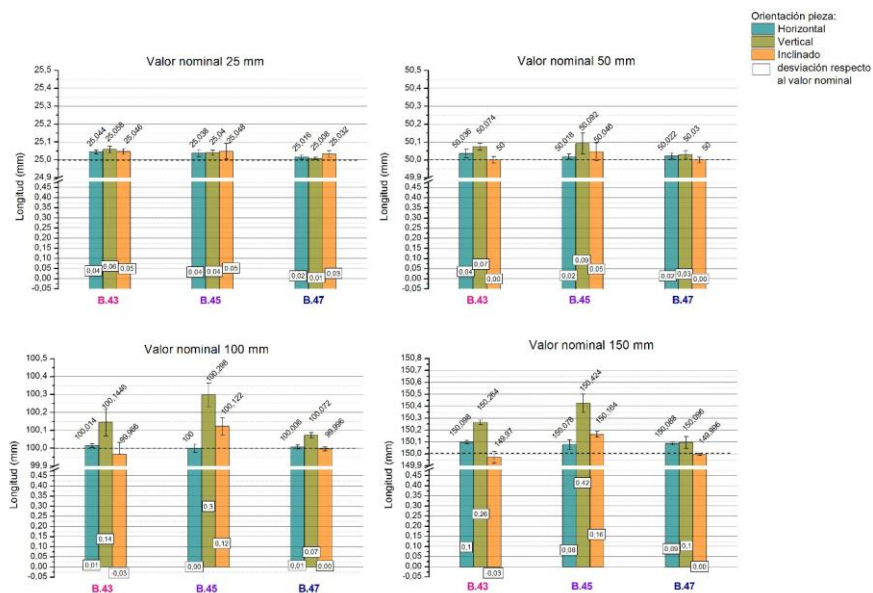


Figura 25. PLETINAS. Resultados de las bandejas 43, 45 y 47 en función de la orientación de la pieza (horizontal, vertical o inclinada)

Se observa que la orientación vertical es la más desfavorable (coincidiendo con el criterio de la empresa proveedora de la tecnología). Dimensionalmente hablando es mejor orientar la pieza horizontalmente y para piezas muy largas la orientación inclinada reduce las deformaciones.

- Evaluación de las desviaciones dimensionales de piezas reales de cobre.

A continuación se muestra un gráfico resumen de las desviaciones medidas en las piezas de

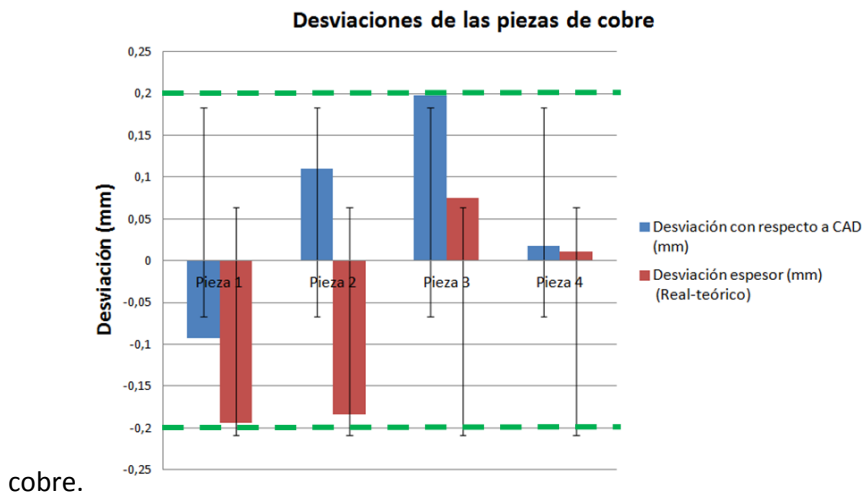


Figura 26. Resultados de las desviación de las piezas de cobre

En general las piezas de cobre: tienden a desviarse de forma positiva con respecto al CAD lo que indica que las piezas se dilatan un poco y el espesor de las piezas tiende a ser menor del teórico. Todas las piezas analizadas tienen una desviación entre ± 0.2 mm, por lo que la tolerancia dimensional de las piezas es de ± 0.2 mm. Esta tolerancia coincide con las tolerancias de fabricación obtenidas del proceso de fabricación de EBM cuando procesa cobre.

PAQUETE DE TRABAJO 5. DISEÑO Y VALIDACIÓN DE LA CONTRADEFORMADA

Para la consecución de los resultados ha sido necesario desarrollar las siguientes tareas:

1. Evaluación de software específico para el cálculo de contradeformada
2. Selección de piezas y diseño de contradeformada
3. Fabricación de la contradeformada en tecnologías aditivas
4. Evaluación dimensional y validación de la contradeformada. Comparativa de los resultados

Tarea 5.1 Evaluación de software específico para el cálculo de contradeformada

Cada vez más se está incluyendo los procesos de fabricación aditiva como procesos de fabricación de piezas industriales alternativos e incluso adicionales a los procesos de fabricación tradicionales. Esto ha provocado que software de simulación de procesos de fabricación convencionales hayan incluido módulos específicos para la simulación de los procesos de fabricación aditiva.

Del mismo modo, el software específico de fabricación aditiva, que generalmente se utilizaba para capear las piezas, colocación y orientación de las piezas en las bandejas de fabricación, actualmente disponen de un módulo de simulación del proceso de fabricación por capas.

Dada la gran diferencia que existe entre el comportamiento de polímeros y metales, y lo complejo que es el proceso de fabricación de metales, que además de cambiar de estado de material, se necesita controlar la evacuación del calor así como generalmente el proceso total implica tratamientos térmicos y mecanizados para reducir soportes, ha provocado que se hayan desarrollado herramientas de simulación de procesos de fabricación aditiva de metales.

Dentro de los programas de simulación de procesos de fabricación aditiva destaca el proceso de fusión de laser de lecho de polvo (LPBF) por las características que tiene este proceso. En este proceso de LPBF la cámara se encuentra a temperatura ambiente y es el láser el que aporta el calor requerido para fundir el polvo. Estas diferencias de temperatura son las causantes de las tensiones inherentes en la pieza. Un buen diseño de pieza junto con un buen diseño de soportes son claves para el éxito. Y este tipo de software ayuda a conocer la mejor orientación y las tensiones que alcanza la pieza lo que se traduce en una mejora del diseño de soportes.

Pese que los software incluyen todos los procesos de fabricación aditiva de metales, tras profundizar en ellos, se considera que son más adecuados para los procesos de LPBF que son más conocidos que el de EBM, fusión de lecho de polvo por chorro de electrones, donde la cámara de trabajo se encuentra a determinada temperatura y donde esta temperatura es la causante de que las deformaciones de las piezas dependan del tamaño de la pieza así como de su ubicación.

Del software identificado se ha seleccionado aquellos que además de simulación del proceso de fabricación aditiva realizan el diseño de la contradeformada así como aquellos disponibles en AIDIMME. Ha sido necesario hacer una actualización de las capacidades de cada uno dado la evolución de este tipo de productos.

De los cuatro software analizados, se han seleccionado dos de ellos

- Software 1: Es uno de los primeros que inició la simulación de este tipo de procesos de fabricación de aporte de material y por lo tanto es uno de los software con más recorrido en este sentido.
- Software 2: Este software forma parte de una plataforma disponible en AIDIMME y sobre la que se incluyen nuevos procesos de simulación y por lo tanto al ver que existe un módulo específico para estos procesos de fabricación aditiva es una oportunidad comprobar su utilización.

De cada uno de ellos se ha identificado la información requerida para hacer la simulación. Existen varios modos de incluir datos, directamente incluir los datos de la máquina de fabricación aditiva o fabricar unas probetas de calibración, se mide la deformación de las mismas y esta deformación es la que se incluyen como parámetros de partida de la simulación.

Tarea 5.2. Selección de piezas y diseño de contradeformada

Además de las piezas identificadas en la tarea 4.1 (voladizos y soporte), hay que destacar que también es importante el diseño de la pieza de calibración, de ellas se obtiene la información básica del proceso para realizar el calibrado del software y las futuras simulaciones.

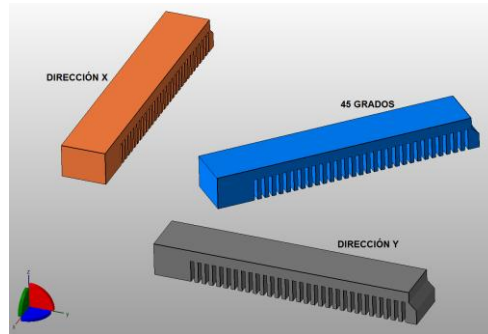


Figura 27. Probetas de calibración

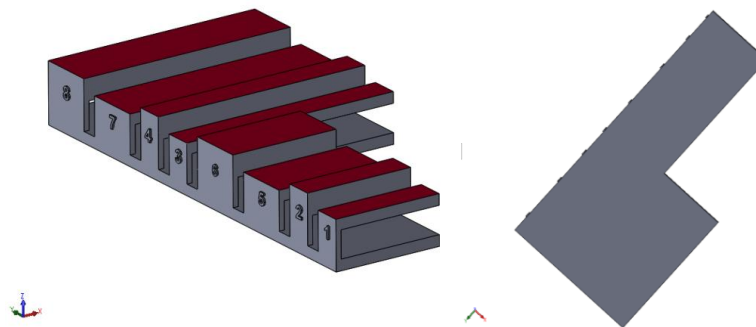


Figura 28. Diseño de la pieza voladizos para hacer el diseño de la contradeformada (PIEZA 1)

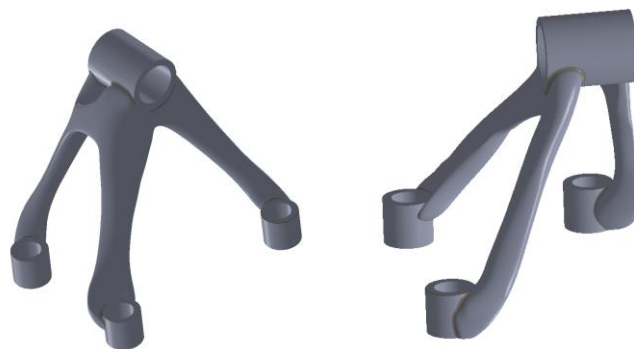


Figura 29. Diseño de soporte (PIEZA 2)

Simulación con el software de simulación 1:

Dada la potencia del software se han realizado las siguientes simulaciones con el fin de comprobar diferentes métodos de cálculo así como la simulación de una única pieza o varias piezas para comprobar el apilamiento y la aplicación de diferentes post-procesos térmicos.

- SIMULACIÓN DE CALIBRACIÓN DEL SOFTWARE

- SIMULACIÓN PIEZA 1:

- Cálculo mecánico basado en las probetas de calibración

- Cálculo termo-mecánico

- SIMULACIÓN PIEZA 2:

- Cálculo mecánico basado en las probetas de calibración, sin tratamiento térmico y optimización de deformadas.

- Cálculo mecánico basado en las probetas de calibración, con tratamiento térmico AIDIMME y optimización de deformadas.

- Cálculo mecánico basado en las probetas de calibración, con tratamiento térmico diferente al de AIDIMME y optimización de deformadas.

- Cálculo termo-mecánico con tratamiento térmico AIDIMME

- Cálculo mecánico de 12 piezas apiladas basado en las probetas de calibración

- Cálculo termo-mecánico de 12 piezas apiladas

La primera actividad de esta tarea consiste en el ajuste del programa en función de la máquina y del proceso mediante la fabricación de las probetas y la medición de las mismas.

El estudio se ha realizado por la tecnología de LPBF (fusión por laser de lecho de polvo) en la aleación Ti6Al4V. Para aprovechar la placa de fabricación, además de las tres probetas se planteó la fabricación de la pieza 1.

Las probetas de calibración no deben llevar soportes y deben ir pegadas a la placa de construcción. Tras la fabricación de las probetas de calibración y la pieza 1, se cortaron por hilo y se midieron para obtener la deformación inherente de cada una de las probetas.

CORTE POR HILO DE LAS PIEZAS DE TIGAL4V GRADO 23 PROCESADO CON LA MÁQUINA PRINT GENIUS 250 DE PRIMA Y MEDICION DE LAS PROBETAS DE CALIBRACIÓN



Las flechas indican la trayectoria del corte por hilo.

El corte se ha realizado a una altura de 4 mm.

La probeta de 45º se ha cortado en dos pasos y se ha cortado un poco el bloque macizo.

Se ha medido con una sonda de profundidad + un bloque patrón

PROBETAS	Z Teórico	Z real	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio medidas	Max. Z-distortion
X	9	9,03	12,00	12,02	11,99	12,01	12,02	12,008	2,978
Y	9	9,03	12,11	12,10	12,10	12,09	12,10	12,100	3,07
45º	9	9,03	12,08	12,07	12,08	12,08	12,08	12,078	3,048

Medidas con Sonda de profundidad digital+Bloque patrón

Max. Z distortion se ha obtenido restando el promedio de la medidas de la Z real.

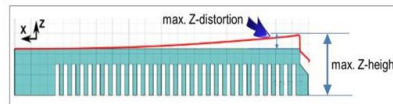


Figura 30. Resultados de la medición de las probetas de calibración

A continuación se muestran imágenes de todas las simulaciones realizadas con el software

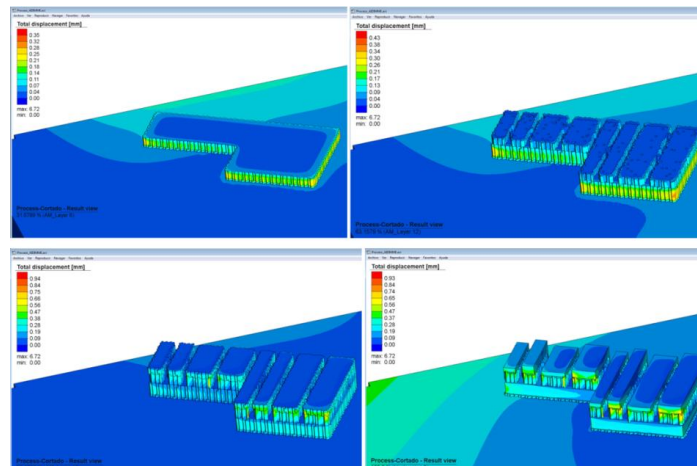
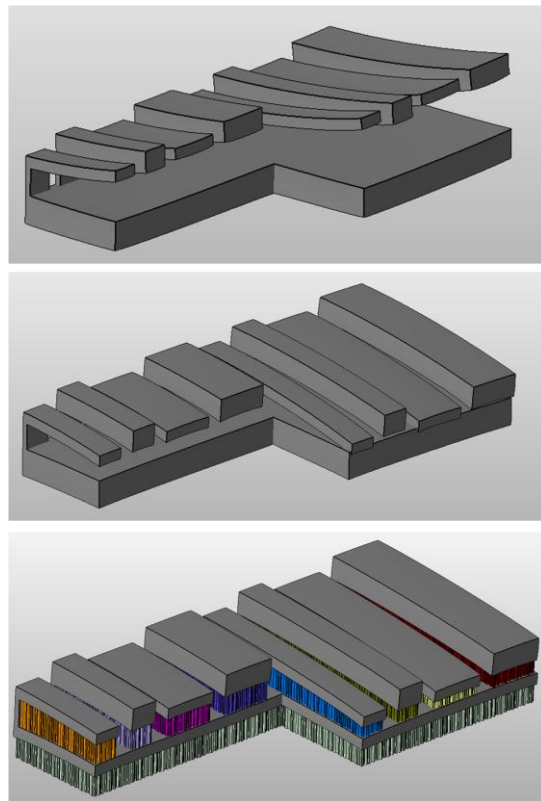


Figura 31. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 1



Fichero:
piezafabricada_deformada.stl: geometría deformada obtenida en la fabricación.

Fichero:
piezafabricada_contraformada.stl: contraformada compensando las deformaciones en dirección contraria a las producidas en el proceso real.

Ficheros:
contraformada_pieza.stl y *contraformada_soportes* constituyen el CAD de partida necesario y sus *soportes*.
La geometría de partida necesaria para obtener unas desviaciones mínimas con el CAD objetivo.

Figura 32. Ficheros resultantes de la primera simulación. Cálculo mecánico pieza 1

SIMULACIÓN SIN TRATAMIENTO TÉRMICO

Deformaciones y tensiones residuales del proceso.

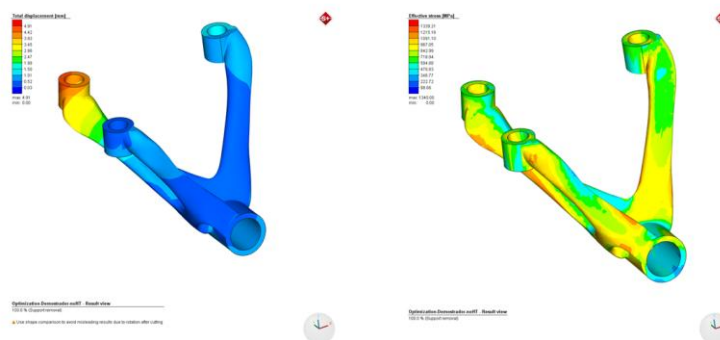


Figura 33. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2

CÁLCULO MECÁNICO BASADO EN PROBETAS DE CALIBRACIÓN
CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE AIDIMME



Figura 34. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2 con tratamiento térmico de AIDIMME

CÁLCULO TERMO-MECÁNICO
CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE AIDIMME



Figura 35. Resultados de simulación. Cálculo termo-mecánico pieza 2 con tratamiento térmico de AIDIMME

CÁLCULO MECÁNICO BASADO EN PROBETAS DE CALIBRACIÓN
CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE AIDIMME

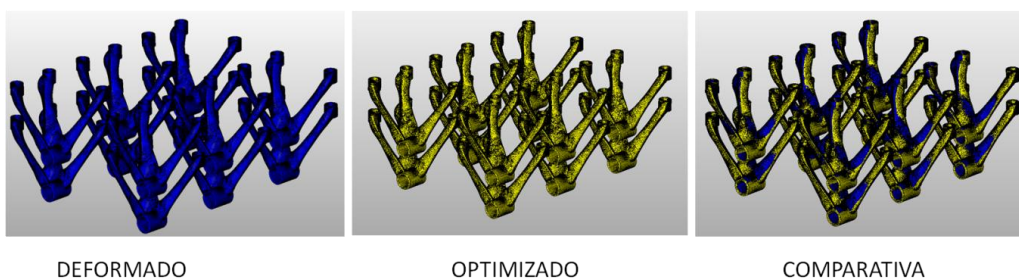


Figura 36. Resultados de la simulación. Cálculo mecánico pieza 2 con 12 copias apiladas

CÁLCULO TERMO-MECÁNICO
CON TRATAMIENTO TÉRMICO DE AIDIMME

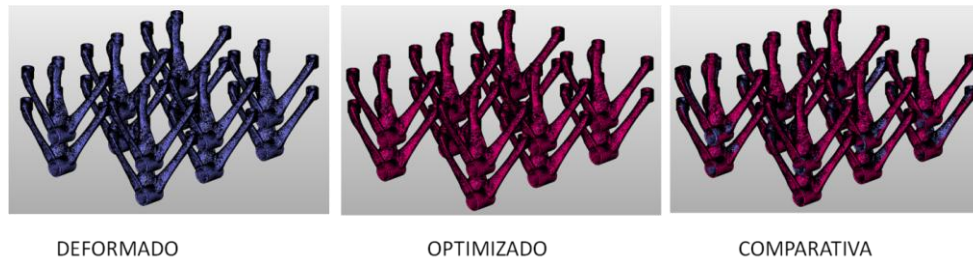


Figura 37. Resultados de la simulación. Cálculo termo-mecánico pieza 2 con 12 copias apiladas

Simulación con el software 2

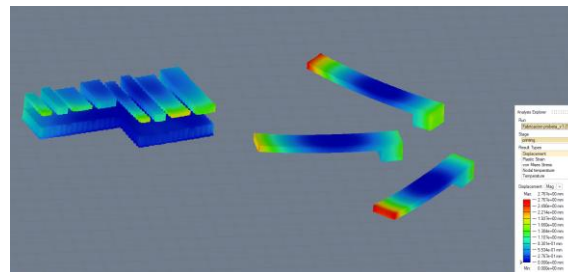


Figura 38. Resultados de la simulación realizada con el software 2

Este software es válido para hacer simulaciones y con él se puede prever las zonas que más tensiones y deformaciones sufren, y por lo tanto aquellas zonas donde hay que reforzar los soportes para que absorban las posibles deformaciones. No es posible actualmente la obtención del fichero de contradeformada, debe ser el diseñador el que a partir de los resultados de la simulación modifique los soportes, la localización y orientación de la piezas o incluso modificar la geometría de la misma en caso que sea posible.

Tarea 5.3. Fabricación de la contradeformada en tecnologías aditivas

Se han fabricado las piezas en Ti6Al4V con la tecnología LPBF. Se ha seleccionado esta tecnología porque es de fusión laser de lecho de polvo y durante el 2020 será incorporada en las instalaciones de AIDIMME.

Se han realizado dos fabricaciones, la primera de ella que incluye las probetas de calibración y la pieza de voladizos original.

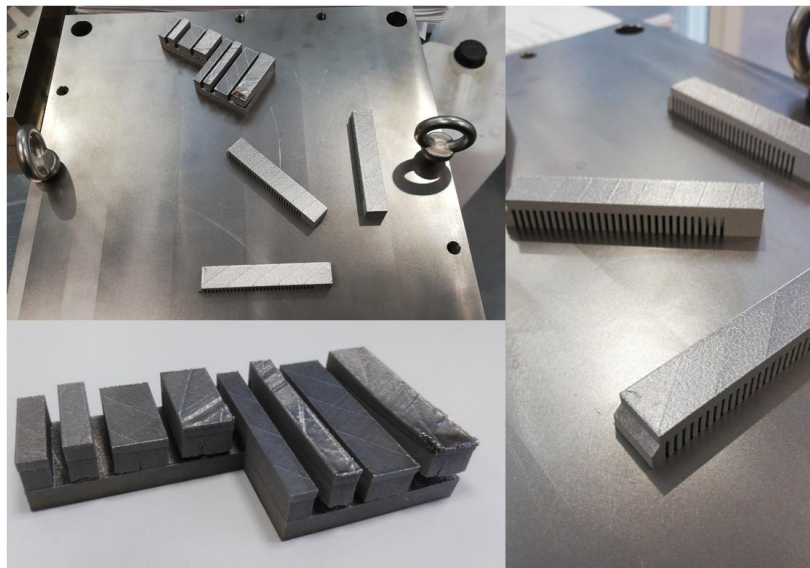


Figura 39. Fabricación 1: Probetas de calibración y pieza de voladizos

En la segunda fabricación se fabricó el modelo de contradeformada calculado inicialmente con el método mecánico basado en las probetas de calibración y manteniendo los mismos parámetros de proceso.

Además de la pieza de voladizos contradeformada, se incluyeron muestras para hacer análisis de la composición química y otras muestras con estructura y pequeños agujeros para conocer la calidad superficial y la precisión dimensional de esta tecnología.

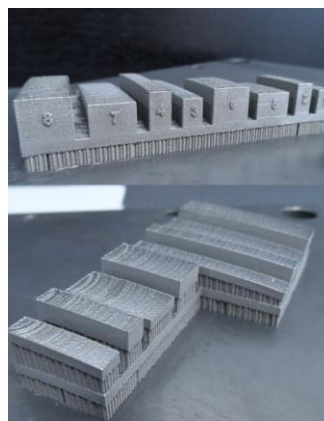


Figura 40. Fabricación 2: Detalle pieza contradeformada

No se ha fabricado el Soporte (PIEZA 2) diseñado, principalmente porque AIDIMME no dispone de la máquina de fabricación aditiva todavía y no es posible hacer un control total de los parámetros de fabricación y de todas las condiciones que rodea la fabricación, así como la

evaluación de la influencia de los tratamientos térmicos evaluados durante el proceso de simulación.

Tarea 5.4. Evaluación dimensional y validación de la contradeformada. Comparativa de los resultados

Para que los resultados de la simulación y la realidad sean comparativos es necesario el control total del proceso de fabricación. Tal y como se observa en la siguiente tabla tras evaluar la desviación superficial de la contradeformada con respecto al CAD han salido valores negativos, algunos cercanos a cero pero no todos.

Tras la evaluación de los valores, se concluye que no ha deformado tanto como se tenía previsto tal y como había calculado el software. Puede ser por varios motivos:

- Para que los resultados de la simulación y la realidad sean comparativos es necesario el control total del proceso de fabricación. En este caso AIDIMME no ha realizado ni la simulación ni la fabricación ya que no dispone de estos medios actualmente en sus instalaciones.
- En esta contradeformada se han utilizado los soportes propuestos por el software, en la primera fabricación se consideró como soporte más adecuado hacer un soporte solido en la parte de abajo para llegar a la placa. Esto también ha provocado que haya ciertas diferencias entre la simulación y la realidad.
- Cortar la pieza de la placa ha provocado que aumenten las deformaciones de la zona de abajo y por lo tanto ha sido más complicado identificar correctamente las deformaciones de la zona de los voladizos ya que es muy importante alinear correctamente la pieza para obtener su desviación. Este proceso de alineación es más difícil de realizar si la pieza se ha deformado también por abajo.
- Cabe destacar que dependiendo de la pieza a evaluar, como es el caso de la pieza de voladizos, será más preciso si se evalúa la desviación antes de quitar la pieza de la placa.

Es importante destacar la posibilidad de simular todo el proceso de fabricación incluyendo tratamiento térmico y el corte. Es fundamental para un diseñador hacer una simulación y conocer las zonas críticas de las piezas y por tanto pueda modificar el diseño de la pieza para evitar deformaciones como puede ser la modificación de la geometría de la pieza o modificación de los soportes. Además es posible simular la fabricación de múltiples pieza incluso apiladas en altura donde se puede comprobar la mejor posición de las piezas y de los soportes, así como se identifica aquella que es más crítica porque se alcanzan más tensiones.

CONCLUSIONES

Se han evaluado y caracterizado los resultados técnicos obtenidos en el proyecto. Podemos destacar las siguientes conclusiones:

- **Desviaciones dimensionales del titanio procesado por EBM:**
 - Las desviaciones en Z son independientes de la posición de las piezas en la bandeja (posición lateral y central). La dispersión obtenida para 25 mm es pequeña, y crece según aumenta los valores nominales, llegando a valores de -1.4 mm para una cota de 300 mm.
 - Las orientaciones a cierto ángulo (tanto 22.5º como 45º) presentan menor desviación en todas las muestras independientemente de los valores de los voladizos, si obviamos los datos de la muestra 7 que no siguen la tendencia de las otras muestras.
 - Hay que evitar en la medida de lo posible longitudes grandes con pequeños espesores.
 - Con respecto a las muestras orientadas a 0º, se obtiene menos desviación en la zona lateral del volumen de fabricación que en el centro del mismo.
- **Desviaciones dimensionales del cobre procesado por EBM:**
 - En la posición lateral de la bandeja, la desviación media en X para valores nominales entre 28-103 mm es alrededor de +0.1/0.15 mm.
 - En la posición lateral de la bandeja, la desviación media en Y presenta valores positivos llegando a un máximo de +0.35 y negativos con un valor de -0.15 mm.
 - Con respecto a las cotas en Z, presenta menor desviación las medidas realizadas en la pieza de las zona central. En la zona lateral las desviaciones para pueden llegar a -1.5 mm de valor medio.
 - Es necesario orientar con un cierto ángulo las piezas a fabricar para la obtención de piezas de calidad, no se ha podido medir la desviación de las piezas inclinadas.
 - En el caso del análisis de las piezas reales, todas las piezas analizadas tienen una desviación entre ± 0.2 mm, por lo que la tolerancia dimensional de las piezas es de ± 0.2 mm que coincide con los datos obtenidos de las tolerancias de fabricación de cobre por EBM.
- **Desviaciones dimensionales de la poliamida 12 procesado por MJF**
 - En la posición esquina delantera de la bandeja, la desviación media en X para valores nominales entre 25-100 mm está entre +0.12/0.22 mm. Todas las medidas muestran desviación en positivo.
 - La desviación media en Y es ligeramente superior, +0.2/0.55 mm.
 - La desviación media en Z en ambas esquinas es similar, sin embargo en la zona central de la bandeja las desviaciones son menores.
 - Las desviaciones en Z son menores en la zona central de la bandeja. Esto ocurre tanto para valores nominales pequeños como grandes. Las desviaciones

- en X son ligeramente menores que en Y para piezas situadas en ambas esquinas de la bandeja de fabricación.
- Los voladizos de menor longitud (20 mm) presentan menos desviación que los que tienen mayor longitud (40 mm). En general, existe bastante dispersión en los resultados independientemente de la localización y orientación de las piezas. Los valores más bajos de desviación se encuentran en la orientación 0 ° en central y la orientación de 22.5 ° para longitudes de voladizo menores.
 - En general, se produce mayor desviación cuando el espesor del voladizo es mayor. Las desviaciones pueden estar afectadas también por las piezas que se construyeron alrededor de las piezas de voladizo ya que aportan calor e influyen considerablemente en el tiempo de solidificación de las piezas, y por tanto en la posibilidad de deformación.
 - Prácticamente todos los valores son negativos, se atribuye a que el material es polimérico y se fabrica sin soportes, por lo que el material tiende a bajarse por gravedad, bien durante el proceso de construcción capa a capa o durante el enfriamiento.
- **Software de simulación de procesos de fabricación aditiva.**
 - Actualmente los software identificados son adecuados para la simulación del proceso de fabricación aditiva metálica y en concreto más especializados para simular el proceso de LPBF, fusión de laser de lecho de polvo.
 - Con respecto al diseño de la contradeformada, es posible su diseño automático. No se ha podido comprobar con exactitud al no tener un control total del proceso de fabricación y por haber cortado la pieza de la placa y por lo tanto las deformaciones de la pieza suman las deformaciones de los voladizos más la de la zona de abajo.
 - **Análisis de los métodos de verificación dimensional**
 - Manual- Pie de rey: Muy limitado su uso, para zonas fácilmente accesibles.
 - Medición con una máquina de coordenadas: Gran precisión, es indicado para conocer tolerancias dimensionales y formas de ciertas características de una pieza (diámetros, posicionamiento de agujeros, planitud, etc...). Adecuado para obtener las tolerancias de un proceso de fabricación como es el caso de la fabricación aditiva.
 - Digitalizado mediante escáner 3D: Adecuado para la verificación de las deformaciones que pueden presentar las piezas de FA mediante la comparación entre el CAD teórico y el escaneado de la pieza real. Dependiendo del tamaño de las piezas o de ciertas características es mejor el uso de escáneres de luz estructurada (piezas o detalles de pieza pequeños) o láser (piezas de medianas a grandes).
 - Tomografía computerizada: Indicado para piezas críticas en las que además de su verificación dimensional es importante conocer la densificación del material. Adecuado para piezas con tubos o huecos interiores para conocer si los huecos interiores están limpios de posible polvo y conocer los espesores. Fundamental su uso en piezas con responsabilidad mecánica.