



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**Departamento**  
**Área de Conocimiento**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**Correlación numérico-experimental de las dispersiones  
termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante  
fusión de filamentos de polímeros**

Grado en: Doble grado ingeniería mecánica e ingeniería en diseño y desarrollo del producto

Autor: Olavarría Lara, Elena

Tutor: Pedraza Rodríguez, Consolación

Cotutor: Castillo López, Germán

MÁLAGA, 12 de Junio de 2023







UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**TITULO:**

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

**RESUMEN:**

Durante el proceso de fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros se introducen tensiones termomecánicas que provocan deformaciones.

Mediante el presente TFG se pretende, por un lado, comprender la simulación que realiza el software de elementos finitos Digimat del citado proceso; para ello se ha realizado un estudio termográfico del proceso, midiendo la temperatura en el proceso de fabricación real de polímeros que permitirá evaluar las simplificaciones introducidas en la simulación.

En cuanto a las deformaciones, el coeficiente de dilatación térmica del polímero utilizado es un factor clave que influye en la deformación de las piezas fabricadas. Por lo tanto, se ha llevado a cabo un estudio para medir el coeficiente de dilatación térmica real del polímero utilizado en esta investigación, ABS, sobre fabricación aditiva.

Además, se realiza un estudio detallado variando los espesores de rejilla de la probeta. El objetivo final es comparar los resultados numéricos y simulados del estudio y analizar la relación deformación-espesor que se produce en la impresión por filamentos fundidos con ABS.

**PALABRAS CLAVE:**

Impresión 3D, ABS, estudio termográfico, simulación





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**TITLE:**

Numerical-Experimental Correlation of Thermomechanical Dispersion Induced during Additive Manufacturing via Polymer Filament Fusion

**ABSTRACT:**

Thermomechanical stresses are introduced during the additive manufacturing process using polymer filament fusion, leading to deformations.

This bachelor's thesis aims to understand the simulation performed by the finite element software Digimat for the aforementioned process. To achieve this, a thermographic study of the process has been conducted, measuring the temperature during the real polymer manufacturing process, which will allow evaluating the simplifications introduced in the simulation.

Regarding the deformations, the thermal expansion coefficient of the polymer used is a key factor that influences the deformation of the manufactured parts. Therefore, a study has been carried out to measure the actual thermal expansion coefficient of the polymer used in this research, ABS, for additive manufacturing.

Furthermore, a detailed study is conducted by varying the grid thickness of the specimen. The ultimate goal is to compare the numerical and simulated results of the study and analyze the deformation-thickness relationship that occurs in filament-based 3D printing with ABS.

**KEYWORDS:**

3D printing, ABS, thermographic study, simulation



## 1. Índice general

<b>1. ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>9</b>
<b>2. ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>3. ÍNDICE DE IMÁGENES .....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1. ANTECEDENTES. CONTEXTUALIZACIÓN DEL TEMA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	14
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	15
<b>2. MARCO TEÓRICO. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>17</b>
2.1. INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA POR DEPOSICIÓN DE HILOS FUNDIDOS. ....	17
2.2. EL PROBLEMA TERMO-MECÁNICO .....	20
<b>3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO .....</b>	<b>23</b>
<b>4. SELECCIÓN DEL MATERIAL Y GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS. ....</b>	<b>25</b>
<b>5. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS. ....</b>	<b>27</b>
<b>6. MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN LINEAL DEL ABS. ....</b>	<b>31</b>
6.1. MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN LINEAL MEDIANTE EXTENSOMETRÍA.....	31
6.1.1. Breve introducción a la extensometría.....	31
6.1.2. Puente de Wheatstone .....	32
6.1.3. Termorresistencia [13].....	33
6.1.4. Cálculos .....	35
6.1.5. Puesta a punto .....	39
6.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS. [16].....	40
Soldadura de cables .....	44
6.3. CADENA DE MEDIDA UTILIZADA.....	44
6.4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	45
<b>7. MEDICIÓN DE TEMPERATURAS DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN, MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....</b>	<b>48</b>
7.1. LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	48
7.2. CADENA DE MEDIDA UTILIZADA.....	49
7.3. ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS .....	50
7.3.1. Calibración de la emisividad .....	50
7.3.2. Medición 1: Enfriamiento de un punto concreto durante la impresión .....	50
7.3.3. Medición 2: Enfriamiento global de la pieza.....	54
<b>8. MEDICIÓN DE DISTORSIONES .....</b>	<b>58</b>
8.1. METODOLOGÍA EMPLEADA .....	58
Cadena de medida .....	59

## 0. Índice

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

8.2.	RESULTADOS.....	61
8.2.1.	Conclusiones .....	63
<b>9.</b>	<b>SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>65</b>
9.1.	EL PROBLEMA TERMOMECÁNICO EN DIGIMAT .....	65
9.2.	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN .....	65
9.3.	RESULTADOS.....	66
9.3.1.	Deformación .....	66
9.3.2.	Temperatura .....	68
<b>10.</b>	<b>CORRELACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.....</b>	<b>73</b>
10.1.	DEFORMACIONES.....	73
10.2.	TEMPERATURA .....	74
10.2.1.	Enfriamiento global de la pieza.....	74
10.2.2.	Enfriamiento de un punto concreto.....	74
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>12.</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>79</b>
<b>13.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>84</b>
1.	RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA .....	88
2.	RESULTADOS DE MEDICIÓN DE DISTORSIONES .....	92
3.	MANUAL APLICADO: DIGIMAT .....	99
4.	MANUAL APLICADO: SIMPLIFY .....	106
5.	MANUAL APLICADO: FLIR RESEARCHIR MAX ORIENTADO A IMPRESIÓN 3D .....	115

## 2. Índice de tablas

### 6. Medición del coeficiente de dilatación lineal del ABS

Tabla 1. Disposición de canales del P3 en la recogida de datos.....	38
Tabla 2. Resultados medición de distorsiones .....	62
Tabla 3. Resultados deformación máxima Digimat.....	68
Tabla 4. Tabla temperatura/ tiempo de un nodo concreto .....	70

## 3. Índice de Imágenes

### 2. Marco teórico. Estado del arte

Ilustración 1 Desperdicios causados por la fabricación substractiva y aditiva. [4] .....	18
Ilustración 2 Esquema de los diferentes procesos de fabricación aditiva. [4] .....	19
Ilustración 3. Esquema del efecto warping [7].....	20

### 4. Selección del material y geometría de las probetas

Ilustración 4. Diferentes porcentajes de relleno de rejilla a 45º. [9] .....	25
------------------------------------------------------------------------------	----

### 5. Fabricación de las probetas

Ilustración 5. Captura de Simplify 3D. Probeta con Grid a 0 y 90º y relleno de 25% .....	28
Ilustración 6. Captura de Simplify 3D. Probeta Rectilinea a 0 y relleno de 100% con soporte .....	28
Ilustración 7. Impresora JCR600 donde de fabricaron las probetas.....	29

### 6. Medición del coeficiente de dilatación térmica del ABS

Ilustración 8. Puente de Wheatstone [11] .....	32
Ilustración 9. Medición a tres hilos y montaje a 1/4 de puente. [12] .....	33
Ilustración 10. Datos del sensor de temperatura de níquel. [13] .....	34
Ilustración 11. Montaje de la termorresistencia. [13].....	34
Ilustración 12. Resultados toma de datos probeta 2 .....	37
Ilustración 13. P3 cableado con los diferentes canales.....	38
Ilustración 14. Instalación de P3 con circuito linealizador. ....	39
Ilustración 15. Gráfica comparativa de toma de datos de la temperatura. ....	40
Ilustración 16. Preparación de las probetas 1 [17].....	40
Ilustración 17. . Preparación de las probetas 2 [17].....	41
Ilustración 18. . Preparación de las probetas 3 [17].....	41
Ilustración 19. . Preparación de las probetas 4 [17].....	41
Ilustración 20. Preparación de las probetas 5 [17].....	41
Ilustración 21. Preparación de las probetas 6 [17].....	42
Ilustración 22. Preparación de las probetas 7 [17].....	42
Ilustración 23. Preparación de las probetas 8 [17].....	42
Ilustración 24. Preparación de las probetas 9 [17].....	43
Ilustración 25. Preparación de las probetas 10 [17].....	43
Ilustración 26. Recomendación curva de curado para el adhesivo M-Bond AE-10 [17]	43
Ilustración 27. Conjunto de medida extensiométrica en el interior de la estufa .....	45
Ilustración 28. Resultados del coeficiente de dilatación térmica.....	46

**7. Medición de temperaturas durante le proceso de fabricación, mediante termografía infrarroja**

Ilustración 29. Cámara termográfica FLIR A6750sc MWIR sobre el trípode .....	49
Ilustración 30. Punto de interés en el momento de extrusión, marcado por el Cursor 1. ....	51
Ilustración 31. Resultados de la medición de temperatura de un punto concreto a lo largo del tiempo .....	51
Ilustración 32. Probeta y ejes .....	52
Ilustración 33. Variación de la temperatura de un punto concreto. 1ª Capa. ....	53
Ilustración 34. Variación de la temperatura de un punto concreto. 2ª Capa.....	53
Ilustración 35. Variación de la temperatura de un punto concreto. 3ª Capa. ....	54
Ilustración 36. Captura de FLIR ResearchIR Max. Enfriamiento. Elementos de toma de datos en el programa .....	55
Ilustración 37. Gráfica enfriamiento global de la pieza al 100% de relleno y modo rectilíneo .....	56

**8. Medición de distorsiones**

Ilustración 38. Línea de medición de la pieza. Imagen extraída del software SolidWorks. ....	58
Ilustración 39. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 25 % de relleno. ....	59
Ilustración 40. Medidor de forma RONDCOM NEX .....	60
Ilustración 41. Palpador y probeta en el medidor de forma. ....	60
Ilustración 42. Comparativa de procesos. ....	60
Ilustración 43. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno .....	61
Ilustración 44. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno corregida .....	62
Ilustración 45. Gráfica medición de distorsiones .....	63
Ilustración 46. Comparativa a simple vista de las probetas 50-1 y 50-2 .....	63

**9. Simulación numérica del porceso de fabricación mediante elementos finitos**

Ilustración 48. Línea de medición de la pieza. Imagen extraída del software SolidWorks .....	67
Ilustración 48. Resultados de la simulación. Comparativa de los distintos % de relleno .....	67
Ilustración 49. Gráfica resultada de la deformación máxima en Y.....	68
Ilustración 50. Enfriamiento simulado con Digimat .....	69
Ilustración 51. Nodo seleccionado en Digimat para la curva temperatura/ tiempo.....	69
Ilustración 52. Curva temperatura/ tiempo de un nodo concreto.....	70

**10. Correlación numérico- experimental**

Ilustración 53. Resultados comparados de la deformación. ....	73
Ilustración 54. Comparativa enfriamiento global experimentales y numérico .....	74
Ilustración 55. Resultados experimental de la medición de temperatura de un punto concreto a lo largo del tiempo .....	75
Ilustración 56. Curva temperatura/ tiempo de un nodo concreto numéricamente .....	75



## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes. Contextualización del tema y justificación de la investigación

La fabricación aditiva de polímeros ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años gracias a su capacidad para crear piezas personalizadas y complejas con un alto nivel de precisión. La deposición de filamentos fundidos capa a capa es uno de los métodos más comunes en la fabricación aditiva de polímeros.

Sin embargo, la relación entre la temperatura y las deformaciones en el proceso de fabricación es un desafío importante en la fabricación aditiva de polímeros. La aparición de gradientes de temperatura en la pieza fabricada puede producir gradientes tensionales que inducen distorsiones térmicas en la pieza. Estas distorsiones pueden ser incompatibles con las tolerancias requeridas.

Para abordar este problema, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la relación entre la temperatura y las deformaciones en la fabricación aditiva de polímeros. Además, la simulación numérica mediante elementos finitos de problemas termo-mecánicos se ha utilizado ampliamente para poder abordar problemas complejos termo-mecánicos y evaluar sus distorsiones.

En particular, se ha utilizado el software de elementos finitos Digimat-AM, basado en MARC-MENTAT, para simular el proceso de fabricación y predecir la deformación de las piezas fabricadas. En los cursos 20-21 y 21-22, se realizaron sendos TFGs “Simulación y optimización del proceso de fabricación de polímeros mediante impresión 3D” [1] y “Estudio numérico del acoplamiento termo-mecánico producido durante la fabricación de piezas, mediante fusión de filamentos poliméricos” [2], respectivamente. Los resultados obtenidos en la correlación numérico experimental no fueron todo lo buenos que se esperaban y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las condiciones térmicas durante la fabricación deben estar más controladas, siendo necesario utilizar una impresora 3D de mayor calidad que la empleada hasta dicho momento.
- La propiedad termo-mecánica que más influía en los resultados era el coeficiente de dilatación lineal del polímero utilizado.
- Se desconocía el coeficiente de dilatación térmica real, encontrando en la bibliografía una gran dispersión de datos para el polímero utilizado (ABS).

Dada la complejidad del estudio numérico acoplado térmico-mecánico, el software introduce simplificaciones importantes del proceso de fabricación. Es necesario corroborar que dichas simplificaciones se ajustan a la realidad.

### 1.2. Objetivos de la investigación

Mediante el presente TFG se pretende, por un lado, comprender la simulación que realiza Digimat del citado proceso, para ello se realizará un estudio termográfico del proceso, midiendo la temperatura en el proceso de fabricación real de polímeros que permitirá evaluar las simplificaciones introducidas en la simulación.

En cuanto a las deformaciones, el coeficiente de dilatación térmica del polímero utilizado es un factor clave que influye en la deformación de las piezas fabricadas. Por lo tanto, se ha llevado a cabo un estudio para medir el coeficiente de dilatación térmica real del polímero utilizado en esta investigación, ABS, sobre fabricación aditiva.

Además, se realiza un estudio detallado variando los porcentajes de relleno de rejilla de la probeta. El objetivo final es comparar los resultados numéricos y simulados del estudio y analizar la relación desplazamiento-porcentaje de relleno que se produce en la impresión por filamentos fundidos con ABS.



## 2. Marco teórico. Estado del arte

### 2.1. Introducción a la fabricación aditiva por deposición de hilos fundidos.

La fabricación aditiva ha permitido generar realidades físicas directamente a partir del modelo tridimensional. Los primeros sistemas, comercializados ya en 1980, producían prototipos con unas características geométricas y físicas que limitaban su aplicación a la visualización de diseños y órganos fundamentalmente. La evolución de la tecnología ha permitido incrementar la calidad de los productos fabricados de manera que se puede ya obtener directamente productos funcionales en determinados campos de aplicación. [3]

Entre las ventajas principales de la fabricación aditiva encontramos:

- Reducción del tiempo entre el diseño y la fabricación, no es necesario moldes o utillajes por lo que es muy aconsejable para series cortas, medias o personalizados.
- Diseño aligerado. La fabricación aditiva genera piezas porosas con características adecuadas, pero más ligeras frente a la fabricación convencional [3].
- Posibilidad de obtener geometrías complejas, dentro de ciertas limitaciones.

Sin embargo, como comenta Orozabala-Brit J [3], se deben tener en cuenta ciertas limitaciones:

- Alto coste para series grandes en comparación con otros procesos de fabricación.
- Reducido abanico de materiales, colores y acabados superficiales.
- Menor precisión que otras tecnologías.
- Características mecánicas y térmicas limitadas.
- Dimensiones de los productos obtenidos limitados por el tamaño de la cámara de impresión.

Quizás la mayor característica de este método de fabricación es la generación casi nula de desperdicio, esto se debe al propio sistema de fabricación. La pieza se discretiza en finas capas de material, estas capas se van superponiendo/ añadiendo una sobre otra construyendo la pieza final. Como se muestras en Ilustración 1, mientras en la fabricación convencional/ subtractiva se parte de un bloque que se

## 2. Marco teórico

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

mecaniza y retira material, en la fabricación aditiva el producto final se construye directamente añadiendo material capa a capa.

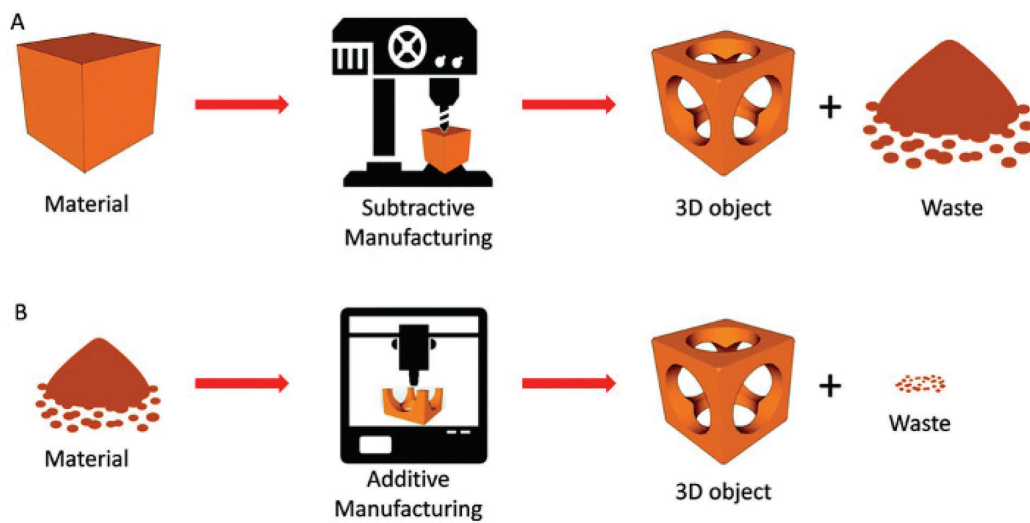


Ilustración 1 Desperdicios causados por la fabricación sustractiva y aditiva. [4]

La fabricación aditiva por filamento fundido consta de las siguientes etapas:

0. Diseño: Se modela el producto deseado en un software CAD de diseño en 3D, obteniendo usualmente un archivo .stl.
1. Parametrizado de la fabricación: En un software especializado se trata el archivo .stl y se seleccionan los parámetros con los que trabajará la máquina de fabricación aditiva. De esta etapa se obtiene la ruta de impresión en un archivo .gcode usualmente.
2. Fabricación de la pieza.
3. Postprocesado: Aunque no requiere un postprocesado tan intensivo como otros tipos de fabricación, dependiendo del proceso de fabricación, la calidad final deseada o la geometría de la pieza es posible que necesitemos una última etapa final.

Tal y como se ha comentado antes existen diversos procesos para la fabricación. Podemos observar un esquema de los más usuales en la industria en la Ilustración 2

## 2. Marco teórico

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

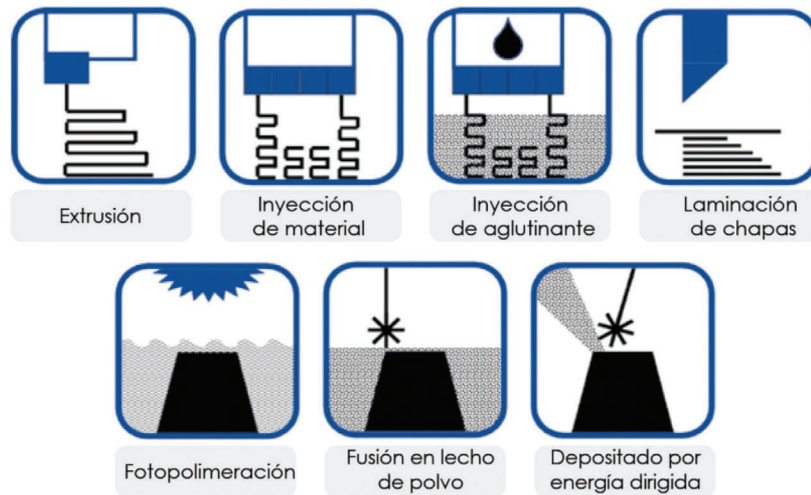


Ilustración 2 Esquema de los diferentes procesos de fabricación aditiva. [4]

Para más información acerca de cada uno de ellos se recomienda consultar la referencia de AENOR [5].

Dependiendo del proceso se podrán fabricar unos materiales u otros, desde polímeros como el ABS y el PLA hasta metales o cerámicos.

El ámbito de estudio de este proyecto será la extrusión de material, en concreto en la fabricación de filamento fundido (FFF)

La tecnología consta de un cabezal donde el material es calentado por encima de su punto de fusión y, a través del extrusor, se va depositando en la cama o plataforma de construcción también caliente, aunque a menor temperatura, normalmente a la temperatura de transición vítrea del material. La temperatura de transición vítrea es aquella en la cual un polímero amorfo pasa de un estado duro/vítreo a un estado blando/correoso, o viceversa.

Por otro lado, es el movimiento del cabezal o una combinación entre el cabezal y la cama lo que permite la deposición del material en la ubicación correcta de la plataforma de trabajo.

El cabezal es continuamente alimentado de material en forma de filamento y va depositando el plástico muy caliente encima de otra capa de plástico. Al juntarse ambas capas se igualan las temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea y se produce la unión, posteriormente, en términos inferiores a un segundo, ambas capas se enfrían, bajando su temperatura por debajo de la de transición vítrea y se solidifican. Por ello la transmisión de calor entre capas y el enfriamiento son base de la calidad de la pieza. [6]

En conclusión, para que obtengamos una impresión de calidad en 3D hay que optimizar la resistencia mecánica de la pieza, así como el cumplimiento de tolerancias y dimensiones. Para mejorar estas características debemos controlar todos los

parámetros operativos durante la impresión [6], en especial, la temperatura y el enfriamiento.

## 2.2. El problema termo-mecánico

Los polímeros utilizados en la impresión 3D pueden sufrir tensiones y deformaciones debido a la dilatación térmica que se produce durante el proceso. Alguno de los factores más influentes en estas son la velocidad de solidificación y enfriamiento del polímero, así como la temperatura ambiente, de la cama y del extrusor. Estos gradientes de temperatura pueden generar tensiones internas y deformaciones que afectan a la impresión, aumentan las tolerancias y disminuyen la calidad final de la pieza. Estas tensiones pueden producir incluso fisuras.

Para mitigar el efecto de estas tensiones en el material, es común tomar ciertas medidas. Por ejemplo, se puede utilizar un adherente a la cama (como la laca, en el caso del ABS) para limitar el warping o alabeo, que es la separación entre la pieza y la cama debido a las tensiones térmicas que impiden la correcta extrusión de las siguientes capas, efecto que se muestra en la Ilustración 3, [7]. Además, se suele imprimir una primera capa llamada balsa que aumente la superficie de contacto entre la cama y la pieza, mejorando la adherencia y limitando las deformaciones.

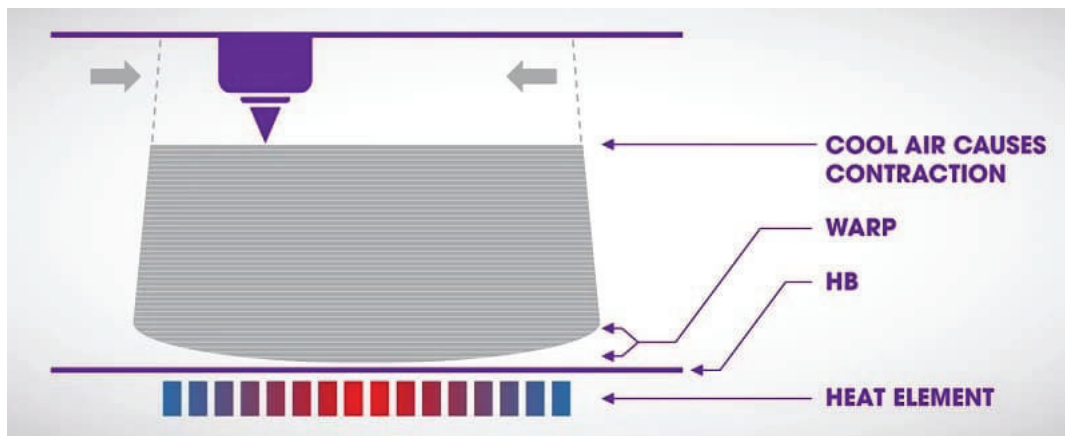


Ilustración 3. Esquema del efecto warping [7]

Es conveniente conocer cómo se producen estas tensiones térmicas para poder corregirlas. Como ya se vio en estudios anteriores [1], [2] hay ciertos parámetros que son determinantes en el proceso. Entre ellos destacamos el coeficiente de dilatación térmica [1], valor que mide la variación de volumen que se produce en un sólido al someterse a cambios de temperatura.

Profundizando en el problema termo-mecánico, como se ha comentado anteriormente en la fabricación por filamento fundidos el material se calienta a altas temperaturas para ser depositado. Se puede definir entonces el fenómeno como un problema termo elástico acoplado transitorio, ya que la temperatura depende del tiempo y estático porque en la pieza impresa no se tienen en cuenta los efectos dinámicos [2].

## 2. Marco teórico

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

Simplificadamente, el problema elástico de un material (al someterse a unas fuerzas generan tensiones que a su vez generan deformaciones) se ve influenciado por el problema térmico. Este problema térmico, originado por las variaciones de calor en el material, también puede verse afectado en menor medida por el problema elástico, sus tensiones y deformaciones.

Es decir, el problema termomecánico acoplado se refiere al balance de energía con densidad constante y balance de momento lineal entre el problema elástico y el problema térmico. Resultando las ecuaciones gobernantes del problema las siguientes:

$$KT_{,jj} - \gamma T_0 \dot{u}_{j,i} = \rho c_p \dot{T} \quad (1)$$

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ij} - \gamma T_{,i} = 0 \quad (2)$$

Donde:

- $T$ : temperatura
- $u_i$ : componente del desplazamiento según la coordenada  $i$
- $K$ : conductividad del material
- $\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha$
- $\alpha$ : coeficiente de dilatación térmica
- $\lambda$  y  $\mu$ : constantes de Lamé
- $T_0$ : Temperatura de referencia
- $\rho$ : densidad del material
- $c_p$ : calor específico



### 3. Metodología y plan de trabajo

1. Estudio previo del estado del arte y determinación de los parámetros a investigar.
2. Estudio del programa Digimat.
3. Modelización mediante Digimat y SolidWorks del proceso de fabricación de una pieza simple.
4. Estudio previo a la impresión 3D del software Simplify y de la impresora por FFF JCR600.
5. Estudio previo a la medición termográfica del software FLIR ResearchIR Max y de la cámara termográfica FLIR A6750sc MWIR.
6. Fabricación de especímenes monitorizando los campos de temperatura mediante termografía infrarroja.
7. Medición del coeficiente de dilatación lineal del polímero depositado.
8. Medición de la deformada de los especímenes fabricados.
9. Correlación numérico-experimental.
10. Elaboración de la memoria de TFG.



#### 4. Selección del material y geometría de las probetas.

La probeta escogida es rectangular de dimensiones de 160x30x6 mm<sup>3</sup>. La idea es continuar la línea de estudio de TFGs anteriores en los que se usaba una probeta de 160X80X6 mm<sup>3</sup>. Sin embargo, se ha reducido el ancho de la probeta para reducir el tiempo de impresión y focalizarse en las desviaciones longitudinales. Como se observó en el estudio anterior [2] la dirección transversal de la probeta no arrojaba datos concluyentes.

Por otro lado, el material a utilizar será el ABS. La elección de este material es motivada por la gran calidad de impresión, incluso en detalles complejos, que permite, siendo hoy en día uno de los más usados para este proceso de fabricación. Su uso varía desde la impresión doméstica hasta el prototipado o piezas finales profesional de diferentes campos. En ámbitos tan variados como la automoción, objetos domésticos o piezas de componentes electrónicos. [8]

El ABS es un terpolímero amorfo producto de la combinación de acrilonitrilo, butadieno y estireno. Tres monómeros cada uno de los cuales aporta una característica significativa al ABS; el acrilonitrilo proporciona resistencia térmica y química y dureza superficial, el butadieno ductilidad y resistencia al impacto y el estireno aporta procesabilidad y rigidez. [2], [8].

El parámetro de análisis de impresión en este estudio será el porcentaje de relleno. Como se comentó en el apartado 2.2 son varios los coeficientes que influyen en la impresión. Sin embargo, para acotar el estudio, se ha decidido variar el porcentaje de relleno ya que es uno de los parámetros más influyentes en los estudios anteriores [1], [4].

Como se comenta en estos y otros proyectos, son cruciales los huecos entre las rejillas formadas al variar el porcentaje de relleno, tal y como se muestra en la Ilustración 4, para la disipación del calor; afectando directamente al gradiente térmico de la pieza. Por ello se escoge este parámetro realmente interesante para estudiar su influencia en las deformaciones.

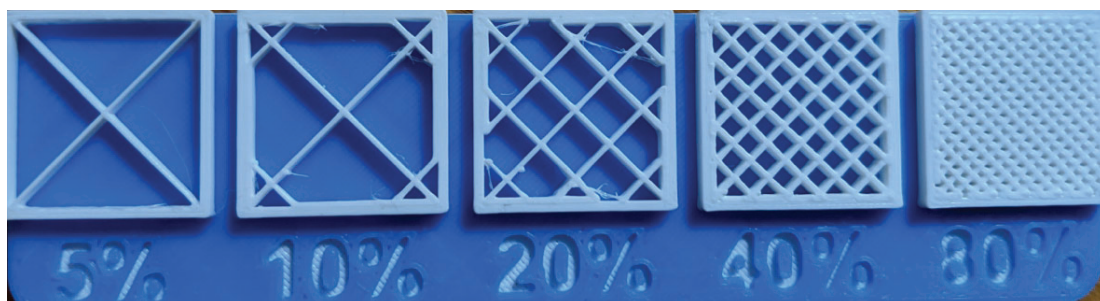


Ilustración 4. Diferentes porcentajes de relleno de rejilla a 45°. [9]



## 5. Fabricación de las probetas.

Como se ha explicado anteriormente en el apartado 2.1 la impresión consta de varias etapas. Para este proyecto se han usado los siguientes elementos para cada una de las etapas.

Para la primera fase de diseño se usa el software SolidWorks. Se modela la probeta de 160X30X6 mm obteniendo el archivo .stl correspondiente. Este archivo únicamente define la geometría del modelo.

En la siguiente etapa, con el software Simplify 3D se pasa de un archivo .stl a .factory definiendo todos los parámetros de impresión y finalmente se obtiene la ruta de impresión, el archivo .gcode. (Para más información acerca de este software y los parámetros consultar en Anexo 0).

En general se han tomado los parámetros de fabricación por referencia aconsejados por el fabricante de la impresora. Tan solo se ha variado el modo de impresión y porcentaje de relleno.

Los valores de los parámetros más importantes son:

- Diámetro del extrusor: 0,6 mm
- Altura de capa: 0,25 mm
- Número de capas finales o de acabado superiores e inferiores: 4
- Número de líneas perimetrales: 2
- Porcentaje de relleno de las capas de acabado: 100%
- Superposición con la línea exterior: 15%
- Temperatura de la cama: 100 °C
- Temperatura del extrusor: 240 °C
- Velocidad de impresión: 3600 mm/min

Para las probetas del estudio de deformaciones el modo de impresión será grid (cuadrícula) con ángulos de impresión de 0 y 90° para formar una cuadrícula orientada en los ejes longitudinal y transversal de la pieza, tal y como se muestra en la Ilustración 5. Por otro lado, el porcentaje de relleno a estudiar será 25%, 50%, 75% y 100%. Se imprimen tres probetas con cada porcentaje de relleno para poder realizar un estudio estadístico de las muestras.

## 5. Fabricación de las probetas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

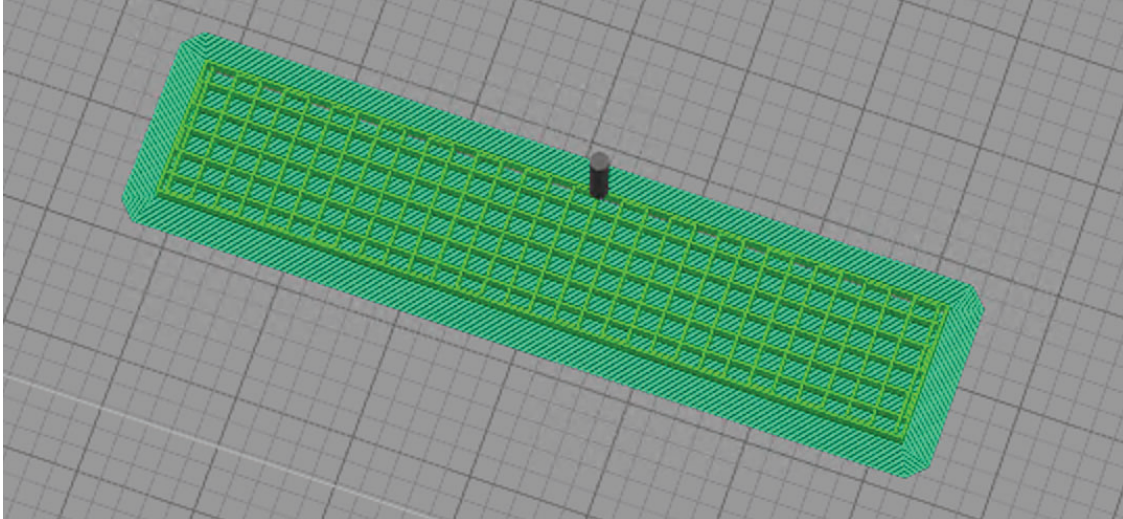


Ilustración 5. Captura de Simplify 3D. Probeta con Grid a 0 y 90° y relleno de 25%

Para la medición del coeficiente de dilatación se realizan 4 probetas con relleno del 100% y patrón de relleno rectilíneo, a 0° orientado las líneas de extrusión de forma longitudinal a la pieza, mostrado en Ilustración 6. Además, tan solo se extruirán una capa superior, una inferior y una línea de perímetro, siguiendo el mismo patrón a 0 grados que el relleno. Esta geometría se ha escogido para tener todo el material orientado en la misma dirección y en la dirección de medida.

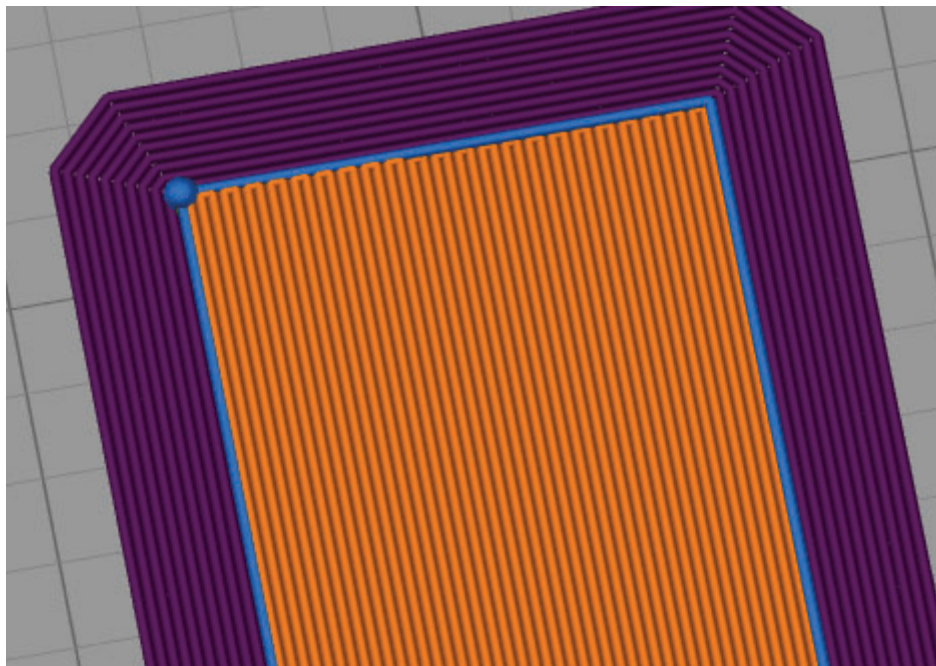


Ilustración 6. Captura de Simplify 3D. Probeta Rectilínea a 0 y relleno de 100% con soporte

Finalmente, se fabrican las probetas en la impresora JCR 600 [10]. Para fijarlas a la cama se utiliza laca comercial de uso doméstico.

## 5. Fabricación de las probetas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros



*Ilustración 7. Impresora JCR600 donde de fabricaron las probetas.*

El post-procesado no es necesario debido a la baja complejidad de las piezas y la ausencia de una calidad superficial exigida.



## 6. Medición del coeficiente de dilatación lineal del ABS.

### 6.1. Medición del coeficiente de dilatación lineal mediante extensometría.

Para la obtención del coeficiente de dilatación térmico lineal del material de impresión se usará la extensometría. Con esta técnica se puede medir la deformación producida en el material. En este caso al someterlo a un incremento de temperatura en una estufa se espera que la deformación obtenida, al no contar con ninguna otra perturbación, sea una deformación térmica. Los datos de deformación y temperatura recogidos serán tratados para obtener el coeficiente de dilatación lineal.

#### 6.1.1. Breve introducción a la extensometría

La extensometría óhmica es un método de medición que utiliza galgas extensométricas, también conocidas como bandas extensométricas. Estos sensores se adhieren a la superficie del objeto que se desea medir, las probetas, y están conectados a un dispositivo indicador que recoge los datos, en este caso un P3.

La galga extensométrica está compuesta por un circuito impreso dispuesto en forma de rejilla sobre un soporte. La mayoría de su longitud se encuentra paralela a una dirección fija. Cuando se quiere medir la deformación en una dirección específica, se adhiere la galga de manera paralela a esa dirección.

Cuando el material se deforma, la longitud de la galga también cambia, lo que a su vez provoca variaciones en su resistencia eléctrica. La variación de resistencia eléctrica ( $\Delta R$ ) está relacionada con la variación de longitud ( $\Delta l$ ) mediante la ecuación fundamental de la extensometría:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon \quad (3)$$

- R representa la resistencia eléctrica de la galga
- l es la longitud de la galga
- $\Delta l$  es la variación de longitud
- K es el factor de galga (la razón entre la variación unitaria de resistencia de la galga, y su alargamiento unitario)
- $\varepsilon$ : Deformación unitaria longitudinal del material

La ecuación establece que la variación de resistencia eléctrica es proporcional a la variación de longitud de la galga.

Por lo tanto, al medir el cambio en la resistencia eléctrica de la galga, podemos obtener información sobre la deformación del objeto que se está midiendo. La extensometría

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

óhmica se basa en el principio de que la variación de la resistencia eléctrica de la galga es proporcional a su variación de longitud.

En resumen, con la extensometría se obtiene una medida precisa de la deformación experimentada por el objeto.

### 6.1.2. Puente de Wheatstone

Para medir las variaciones de resistencia de las galgas se utiliza el puente de Wheatstone. Es un sistema pasivo de dos parejas de impedancias en serie conectadas en paralelo, tal y como se muestra en la Ilustración 8, [11].

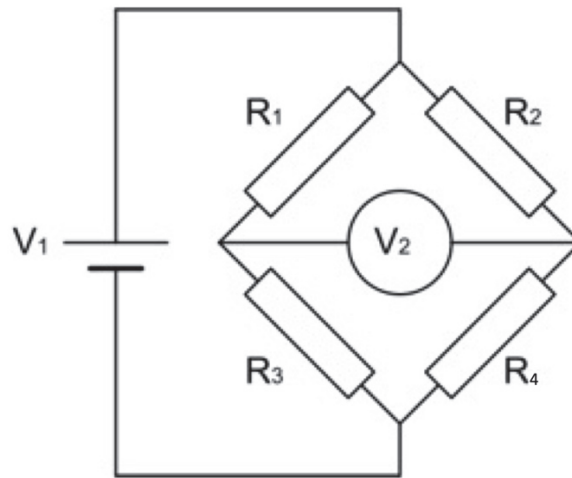


Ilustración 8. Puente de Wheatstone [11]

Cuando el puente está equilibrado no hay diferencia de potencial en la diagonal  $V_2$  siempre que se cumpla:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (4)$$

Sin embargo, manteniendo la igualdad anterior, la variación de las resistencias afectaría a la tensión de salida de la siguiente:

$$\Delta e = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5)$$

Por tanto, se observa que la posición de la resistencia en una u otra rama es determinante por la influencia de su signo sobre la tensión de salida.

Se cumple la regla de que las resistencias de ramas continuas influyen en sentido contrario y las de ramas opuestas en el mismo sentido.

Aplicando estas propiedades al montaje con galgas, se pueden realizar distintos tipos:

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

- Montaje a  $\frac{1}{4}$  de puente: tan solo se monta una galga en cualquiera de las ramas del puente.
- Montaje a  $\frac{1}{2}$  de puente: Se montan dos galgas en brazos opuestos (se suman sus variaciones de resistencia) o en contiguos (se restan).
- Montaje a puente completo: Se montan todas las ramas, su distribución variará según el parámetro de interés.

Por último, el cableado de las galgas también es influyente, sobre todo en montajes a  $\frac{1}{4}$ . La resistencia de los cables podría introducir distorsión si se conectase en serie con la rama activa (medición a dos hilos). Por este motivo, se ha utilizado la medición a tres hilos que ofrece mayor precisión. Conecta la resistencia de los cables en serie a las ramas adyacentes, tal y como se muestra en la Ilustración 9, [12]. Esta medición compensa totalmente los efectos en el desequilibrio de los cables.

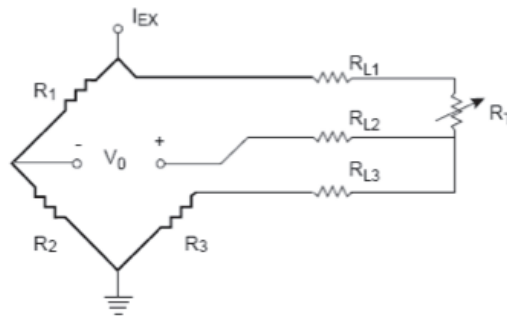


Ilustración 9. Medición a tres hilos y montaje a  $\frac{1}{4}$  de puente. [12]

### 6.1.3. Termorresistencia [13]

En este estudio se utiliza una termorresistencia que tomará datos constantes de la temperatura de la estufa sincronizados con la toma de datos de la deformación de las probetas.

Como se indica en el gráfico, Ilustración 10, el coeficiente de temperatura de resistencia de los sensores de níquel (en el eje de ordenadas) es bastante grande y no lineal. Dado que los sensores TG se utilizan comúnmente junto con galgas extensiométricas, se han desarrollado redes de coincidencia especiales para su uso con instrumentación de galgas extensométricas.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

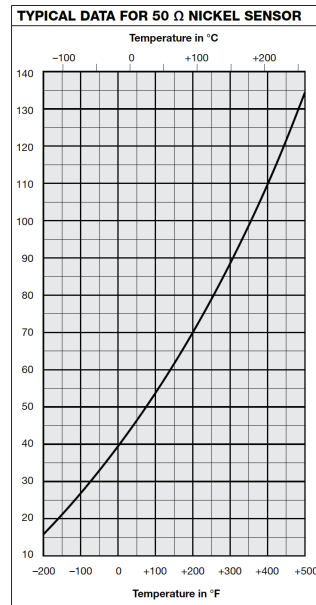


Ilustración 10. Datos del sensor de temperatura de níquel. [13]

Los LST Networks son pequeños dispositivos pasivos encapsulados en una carcasa de resina moldeada. Estas redes se conectan entre los sensores de temperatura TG y la instrumentación de galgas extensiométricas para realizar las siguientes tres funciones:

- Linealizar el cambio de resistencia del sensor de níquel con la temperatura.
- Atenuar la pendiente del cambio de resistencia al equivalente de 10 o 100 micro deformaciones por grado Fahrenheit o Celsius para un ajuste de factor de calibración de 2.000 en el indicador de deformación.
- Presentar un circuito de puente medio balanceado de 350 ohmios al indicador de deformación.

La instrumentación estándar de galgas extensiométricas, como el modelo P3 de Micro-Measurements, es ideal para su uso con estos sensores, lo que elimina la necesidad de comprar dispositivos por separado.

Se ha utilizado en esta medición el LST-10C-350D (MMF006425) – Matching Network. Se conectará siguiendo el montaje recomendado, Ilustración 11, en ½ puente.

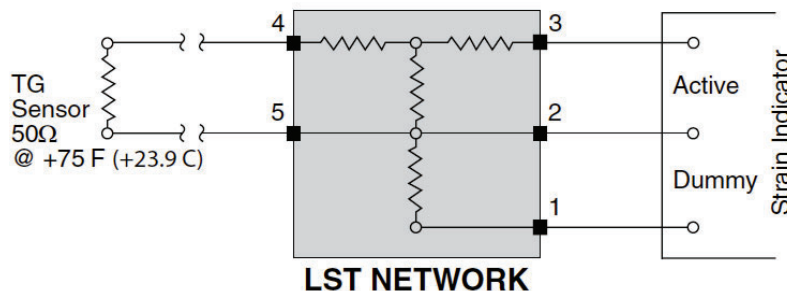


Ilustración 11. Montaje de la termorresistencia. [13]

## 6.1.4. Cálculos

Para este estudio la medición se hace siguiendo la nota técnica TN-514 de la empresa Micro-Measurements [15].

Cuando se instala una galga extensiométrica de resistencia en una muestra sin esfuerzo de cualquier material de prueba y se cambia la temperatura del material, la salida de la galga cambia correspondientemente. Este efecto se denominaba salida térmica.

Se debe a una combinación de dos factores. En primer lugar, al igual que ocurre con la mayoría de los conductores, la resistividad de la aleación de la rejilla de la galga cambia con la temperatura. También se produce un cambio adicional de resistencia debido a que el coeficiente de expansión térmica de la aleación de la rejilla generalmente es diferente al del material de prueba al que está adherida. Por lo tanto, con el cambio de temperatura, la rejilla se somete a una deformación mecánica igual a la diferencia en los coeficientes de expansión.

Dado que la rejilla de la galga está hecha de una aleación sensible a la deformación, produce un cambio de resistencia proporcional a la deformación inducida térmicamente. La salida térmica de la galga se debe a los cambios de resistencia combinados de ambas fuentes. El cambio neto de resistencia se puede expresar como la suma de los efectos de resistividad y expansión diferencial de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta R}{R} = [\beta_G + (\alpha_s - \alpha_G)F_G]\Delta T \quad (6)$$

Donde:

- $\frac{\Delta R}{R}$ : variación de la resistencia unitaria.
- $\beta_G$ : coeficiente térmico de resistividad del material de referencia.
- $\alpha_s - \alpha_G$ : diferencia del coeficiente de dilatación térmica del espécimen a medir y el de la rejilla de la galga, respectivamente.
- $F_G$ : factor de calibración de la galga extensiométrica.
- $\Delta T$ : variación de temperatura.

La deformación unitaria longitudinal debido a al cambio de resistencia en la galga es:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta R/R}{F_I} \quad (7)$$

Donde:

- $F_I$ : Ajuste del factor de calibración del instrumento.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

En caso de que  $F_I$  y  $F_G$  coincida, lo cual es bastante habitual, la salida térmica de la deformación unitaria queda expresada como:

$$\varepsilon_{T|O(G|S)} = \left[ \frac{\beta_g}{F_G} + (\alpha_S - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (8)$$

$\varepsilon_{T|O(G|S)}$ : deformación unitaria para la salida térmica para la rejilla de la galga G en el material de muestra S.

Para un material de referencia cuyo coeficiente de dilatación térmica corresponde a  $\alpha_R$ :

$$\varepsilon_{T|O(G|R)} = \left[ \frac{\beta_g}{F_G} + (\alpha_R - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (9)$$

- $\varepsilon_{T|O(G|S)}$ : deformación unitaria para la salida térmica para la rejilla galga G en el material de muestra R, a partir de ahora material de referencia.

Con la diferencia de las dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$\alpha_S - \alpha_R = \frac{\varepsilon_{T|O(G|S)} - \varepsilon_{T|O(G|R)}}{\Delta T} \quad (10)$$

Así, la diferencia de coeficientes de dilatación, referida a un rango de temperatura particular, es igual a la diferencia de deformaciones en la salida térmica para el mismo cambio temperatura.

La selección del material a utilizar como estándar de referencia es un factor crucial para garantizar la precisión del método, al igual que en cualquier otra forma de dilatometría diferencial. En principio, el material de referencia puede ser cualquier sustancia cuyas propiedades de expansión sean conocidas con exactitud en el rango de temperatura de interés.

Sin embargo, en la práctica, suele ser ventajoso elegir un material con propiedades de expansión lo más cercanas posible a cero. Esta elección garantizará una señal de salida que se corresponda estrechamente con el coeficiente de expansión "absoluto" del material de prueba, lo que permitirá llevar a cabo un procedimiento de prueba más sencillo.

Además, es importante que la expansión térmica del material de referencia sea altamente repetible y estable en el tiempo, a una temperatura constante. Asimismo, el módulo elástico del material debe ser lo suficientemente grande como para que la influencia mecánica de la calibración de deformación sea insignificante.

En esta medición se ha utilizado silicato de titanio cuya referencia es TSB-1 (MMF006664).

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

Para la medición del coeficiente de dilatación térmica lineal se colocaron en cada espécimen a medir dos galgas, una en la cara superior y la otra en la cara posterior. Con esto se quería eliminar las posibles flexiones que se generasen en la pieza al estar sometido a unas variaciones de temperatura que no se conocía con certeza su homogeneidad. Aun así, estas flexiones no han sido relevantes, ambas galgas medían prácticamente lo mismo (Ilustración 12) las deformaciones térmicas. Las posibles discrepancias son debidas a las deformaciones en flexión (en un lado negativa y en el otro positiva).

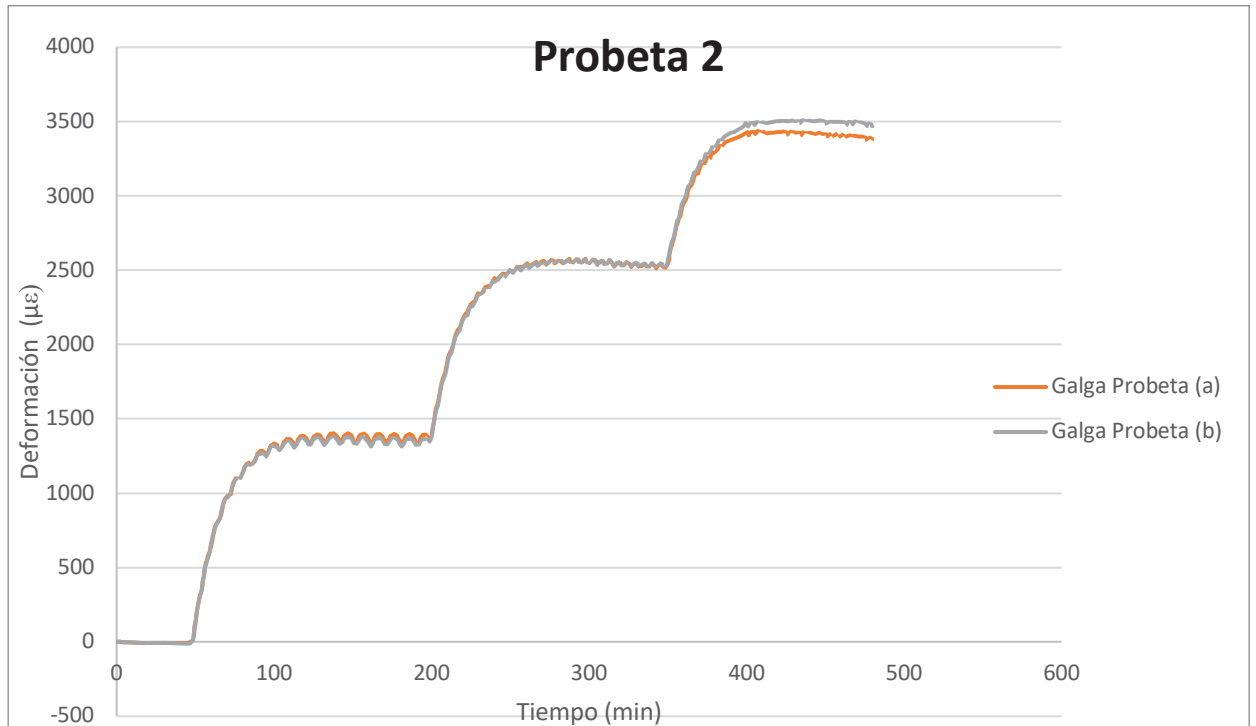


Ilustración 12. Resultados toma de datos probeta 2

Todas las galgas han sido conectadas en  $\frac{1}{4}$  de puente para obtener sus resultados por separado y tratar posteriormente los datos en una hoja de cálculo.

De esta forma el conjunto final de medida conectado al P3 de Micro Measurements se muestra en la Tabla 1:

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

Canal	1
<b>Termorresistencia</b>	
1/2 puente	
K	2
$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	10

Canal	2
<b>Galga probeta</b>	
1/4 puente	3 hilos
K	2,085
R (Ohm)	350

Canal	3
<b>Galga probeta</b>	
1/4 puente	3 hilos
K	2,09
R (Ohm)	350

Canal	4
<b>Galga Referencia</b>	
1/4 puente	3 hilos
K	2,085
R (Ohm)	350

Tabla 1. Disposición de canales del P3 en la recogida de datos

El P3 de Micro Measurements y los canales cableados se muestra en la Ilustración 13 y en la Ilustración 14 se observa la instalación del P3 (elemento de la derecha azul) con el circuito linealizador, LST Network de la izquierda.

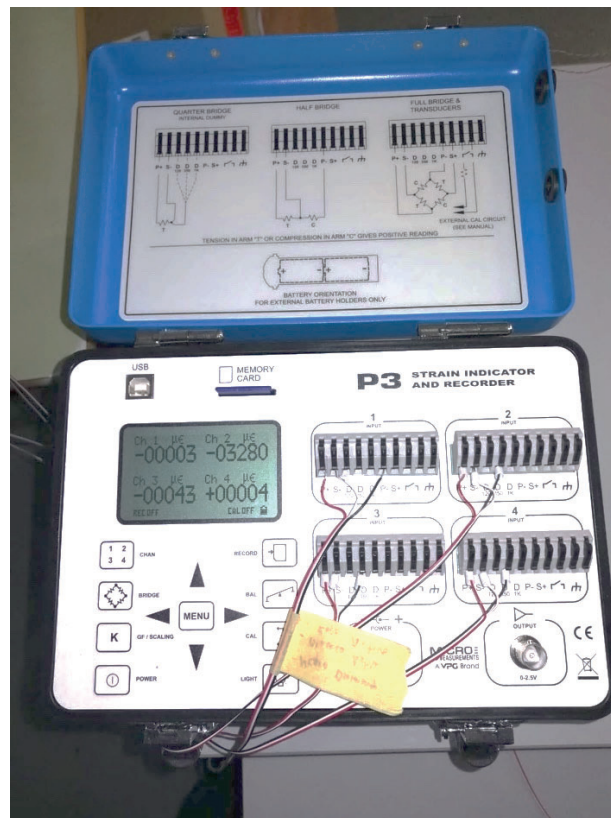


Ilustración 13. P3 cableado con los diferentes canales

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

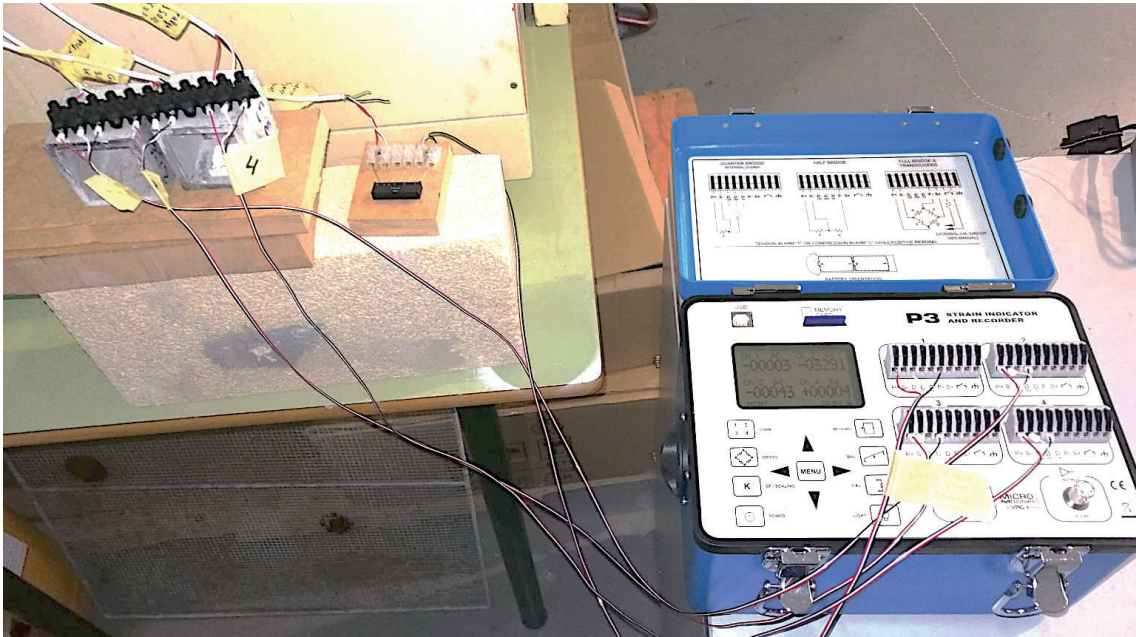


Ilustración 14. Instalación de P3 con circuito linealizador.

### 6.1.5. Puesta a punto

Se realiza una primera medición de la temperatura para comprobar el tiempo que tarda el material y la estufa en estabilizar la temperatura solicitada y corroborar el correcto funcionamiento de todos los componentes.

Como se observa en la Ilustración 15 el tiempo aproximado de estabilización es de dos horas y media.

Por otro lado, se observa que el termopar (que mide la temperatura en la estufa) es mucho más sensible a las variaciones producidas por la estufa para estabilizar la temperatura solicitada. Sin embargo, el material no es capaz de absorber estas variaciones tan rápido, tal y como muestra la curva de la termorresistencia de la probeta de referencia.

Ya que, a pesar de las variaciones, las temperaturas globales marcadas por la termorresistencia y el termopar son muy similares entre sí y a lo indicado a la estufa, se acepta la temperatura marcada por la termorresistencia como válida. Además, para los cálculos del estudio se utilizará esta por ser más precisa a la temperatura real de la probeta.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

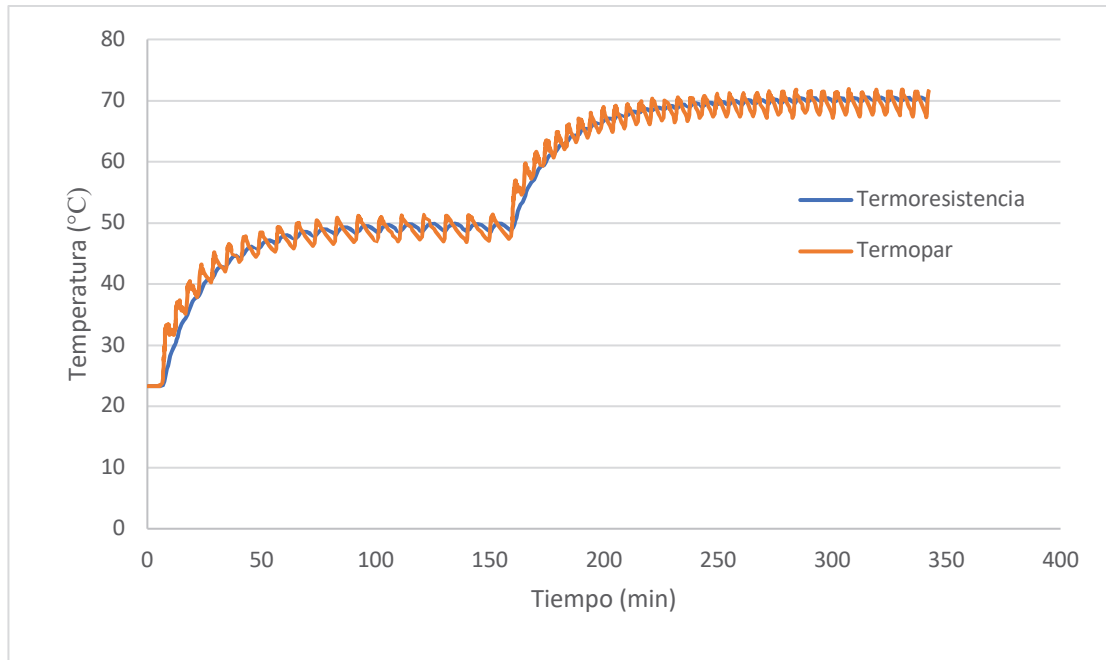


Ilustración 15. Gráfica comparativa de toma de datos de la temperatura.

### 6.2. Preparación de las probetas. [16]

Estos pasos de preparación aseguran una superficie limpia, libre de contaminantes y adecuada para la adherencia de la galga extensométrica.

1. Limpieza grosera de la superficie, eliminando óxidos y pinturas. Desengrasado y secado utilizando alcohol isopropílico para plásticos (ABS). Ilustración 16.



Ilustración 16. Preparación de las probetas 1 [17]

2. Abrasión progresiva utilizando lijas al agua de grano 220 a 320 mantener la superficie húmeda con M-Prep Conditioner. Se eliminan las crestas y se logra una superficie homogénea. Repetir con grano de lija más fino, 400. Ilustración 17.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

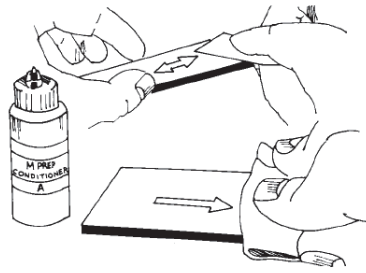


Ilustración 17. . Preparación de las probetas 2 [17]

3. Aplicar el neutralizador M-Prep Neutralizer 5A con la superficie húmeda y limpiar antes de que se seque. Ilustración 18.

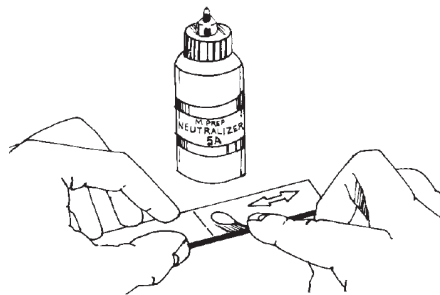


Ilustración 18. Preparación de las probetas 3 [17]

4. Colocar la galga sobre un cristal limpio y asegurarla con cinta adhesiva en el centro. Ilustración 19.

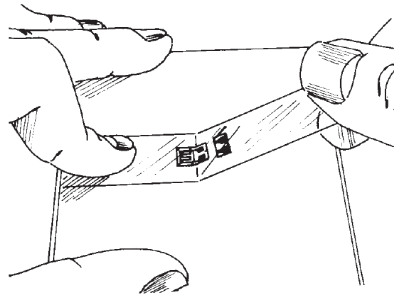


Ilustración 19. Preparación de las probetas 4 [17]

5. Alinear la galga sobre la superficie de la pieza siguiendo las marcas de alineación. Ilustración 20.

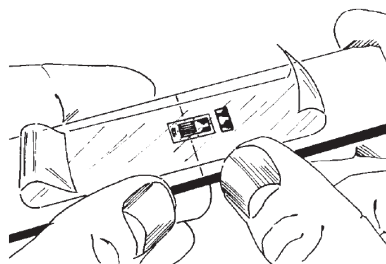


Ilustración 20. Preparación de las probetas 5 [17]

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

- Levantar la cinta para liberar la galga y los terminales, doblar la cinta en aproximadamente  $45^\circ$  y presionar para asegurar el correcto levantamiento. Ilustración 21.

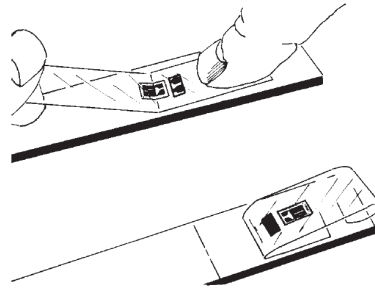


Ilustración 21. Preparación de las probetas 6 [17]

- Aplicar adhesivo, M-Bond AE-10 en el espécimen y la galga, cubriendo una línea más grande que la galga. Procede sin demora al siguiente paso. Ilustración 22.

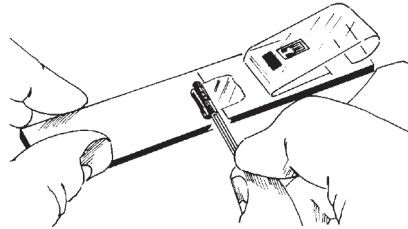


Ilustración 22. Preparación de las probetas 7 [17]

- Posicionar la cinta sobre la pieza en un ángulo de unos  $30^\circ$ , mantener tensa e ir deslizando una gasa para asegurar la alineación y evitar burbujas de aire. Una capa fina y uniforme de adhesivo es lo ideal para un rendimiento óptimo de la unión. Ilustración 23.

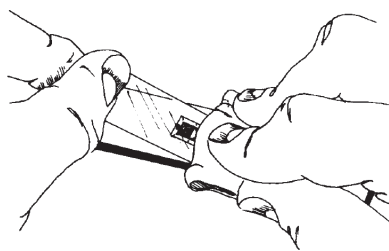


Ilustración 23. Preparación de las probetas 8 [17]

- Coloca una almohadilla de silicona y una placa de respaldo sobre la instalación de la galga. La almohadilla de silicona debe ser suave (durómetro A40-60) y tener un grosor de al menos  $3/32$  pulgadas [2.5 mm]. Esto permitirá que la fuerza de sujeción se aplique de manera uniforme sobre la galga. El área de la almohadilla de silicona debe utilizarse para calcular la presión de sujeción final. Ilustración 24.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

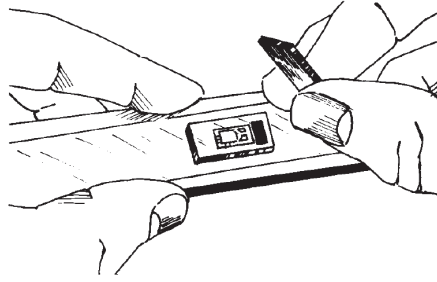


Ilustración 24. Preparación de las probetas 9 [17]

10. Aplicar una fuerza en pinza al conjunto de 35 a 135 kN/m<sup>2</sup>. Aplicar especial cuidado a la distribución uniforme de la presión sobre la galga. Ilustración 25.

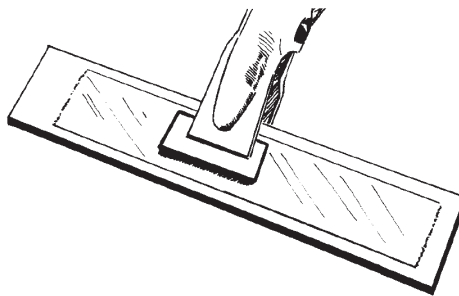


Ilustración 25. Preparación de las probetas 10 [17]

11. No es necesario quitar esta cinta inmediatamente después de la instalación de la galga. La cinta ofrecerá protección mecánica para la superficie de la rejilla y se puede dejar en su lugar hasta que se retire para el cableado de la galga.
12. Estos sistemas pueden no curarse correctamente por debajo de +70°F [+20°C]. Un post-curado de al menos dos horas a una temperatura de al menos +25°F [+15°C] por encima de la temperatura máxima de funcionamiento, sin utilizar el dispositivo de sujeción, proporcionará un rendimiento prácticamente libre de deformación. La curva de curado del adhesivo utilizado se muestra en la Ilustración 26.

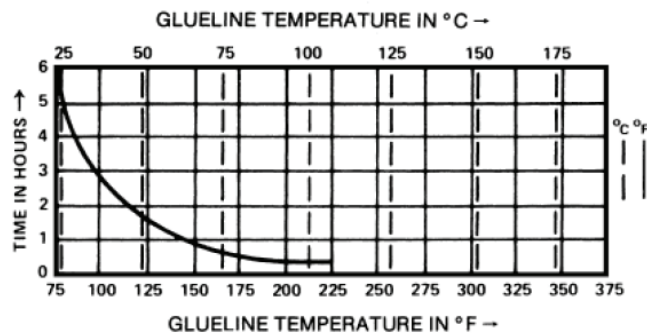


Ilustración 26. Recomendación curva de curado para el adhesivo M-Bond AE-10 [17]

### Soldadura de cables

1. Preparar el cable quitando algunos hilos y se deposita estaño en la punta.
2. Proteger la banda con papel autoadhesivo, dejando expuestos solo los puntos de soldadura.
3. Aplicar una pequeña gota de soldadura sin aplicar demasiado calor para evitar desprender la banda del soporte. Realizar la operación en no más de dos segundos, repitiendo si es necesario.
4. Unir los cables a los terminales y a la banda manteniendo caliente y limpio el soldador, sin aplicar soldadura adicional.

### 6.3. Cadena de medida utilizada.

Los componentes utilizados para la medición fueron:

- Termorresistencia de níquel ETG-50B/W.
- Network LST LST-10C-350D de Micro-Measurements (MMF006425).
- Galgas extensométricas de Micro-Measurements CEA-06-250UNA-350 (MMF404864).
- Estufa.
- P3 de Micro-Measurements.
- Termopar.
- Probeta 0 o de referencia silicato de titanio cuya referencia es TSB-1 (MMF006664).
- Componentes sobre los que se realiza la medición: 3 probetas de ABS con impresión a 0° rectilínea y 100% de relleno.
- Cables eléctricos de igual longitud que soportan una temperatura máxima a 260°C de Micro-Measurements 430-FSRT 100' (MM006524).

Se muestra en la Ilustración 27 el interior de la estufa con las probetas de ABS (negra) y de referencia (traslúcida) con las galgas extensométricas y la resistencia eléctrica adheridas y soldadas a los cables.

Se puntualiza que la resistencia eléctrica estará adherida tan solo a la galga de referencia mientras que las galgas extensométricas están dispuestas en ambas probetas.

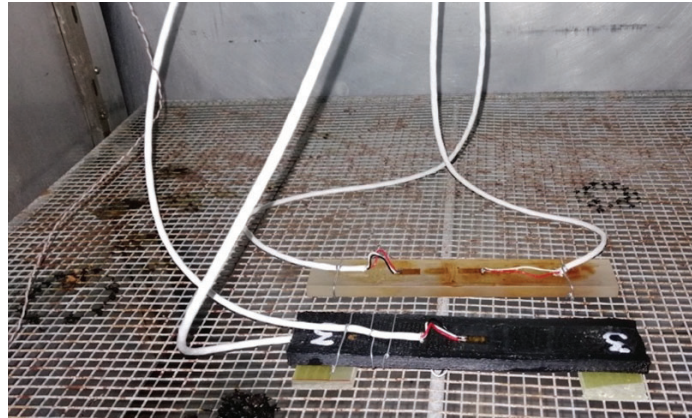


Ilustración 27. Conjunto de medida extensiométrica en el interior de la estufa

### 6.4. Resultados obtenidos.

Se realizan tres ensayos variando la temperatura en tres intervalos estabilizados, sin superar el umbral de los 100°C para evitar la alteración del adhesivo de las galgas y del material de las probetas, ABS.

Observando los resultados, Ilustración 28, se puede concluir que las variaciones medidas del coeficiente de dilatación lineal en función de las temperaturas estudiadas se encuentran dentro de la dispersión de los resultados. Por ello, y para su utilización en las simulaciones numéricas se estima  $\alpha = 158 \pm 4 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ .

El resultado es la media del coeficiente obtenido para cada uno de los tres intervalos de temperatura estudiados. En la Ilustración 28 se muestran los valores medios de los estudios para las tres temperaturas con sus correspondientes desviaciones estimadas.

Los resultados detallados de cada uno de los estudios se encuentran en el anexo 0.

## 6. Medición del coeficiente de dilatación

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

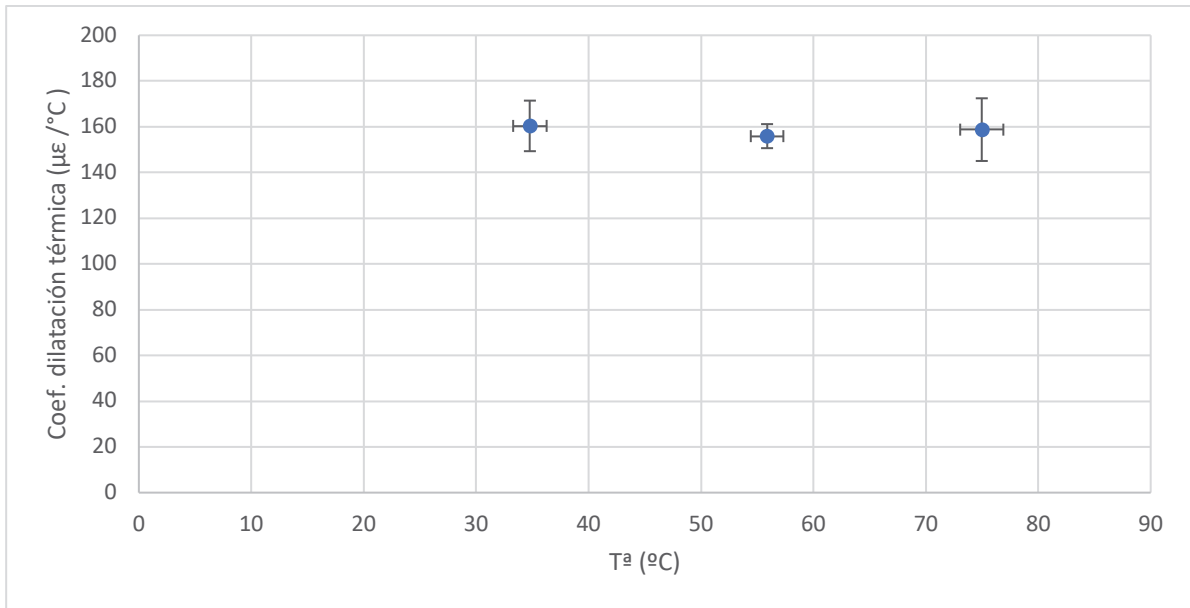


Ilustración 28. Resultados del coeficiente de dilatación térmica

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

## 7. Medición de temperaturas durante el proceso de fabricación, mediante termografía infrarroja

### 7.1. La Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica utilizada para medir temperaturas de manera no invasiva, mediante la captación de la intensidad de radiación infrarroja que emiten los cuerpos. Siguiendo ley del cuerpo negro todos los objetos por tener mayor temperatura que el cero absoluto emiten radiación en todo el espectro, esta radiación depende de la temperatura a la que se encuentre el cuerpo. Por este motivo la lente de una cámara infrarroja debe procurar mantenerse lo más cercana posible al cero absoluto.

Las cámaras termográficas son herramientas útiles para la medición de temperaturas en objetos. La energía radiada, que es invisible al ojo humano, se convierte en una imagen visible formada por el conjunto de la temperatura de cada uno de los puntos capturados y procesados por la cámara.

La termografía infrarroja tiene diversas aplicaciones en diferentes campos, como la industria, la medicina, la construcción y la ciencia en general. Es una técnica muy útil para la detección temprana de anomalías térmicas, identificación de puntos calientes o fríos, análisis de procesos de producción y mantenimiento preventivo, entre otros. En este caso, aportará el estudio térmico real durante el proceso de impresión 3D para ser posteriormente comparado con el simulado.

Para realizar una correcta medición se deben tener en cuenta los siguientes factores [18]:

- Material a medir: emisividad de la superficie del objeto que se traduce en la capacidad de dicho material de irradiar energía infrarroja
- Distorsión por reflejos de objetos cercanos: radiación emitida por los objetos de alrededor que afectan al resultado de la medición
- Absorción atmosférica: reducción de la radiación emitida por el objeto al atravesar la atmosfera. Esta reducción de la radiación aumenta con alta humedad atmosférica o partículas en el aire y con la distancia a la que nos situemos del objeto a medir.
- Temperatura ambiente: proporción de la radiación que es reflejada en la superficie

Conceptos importantes para la entender la termografía infrarroja:

- Emisividad: propiedad física que cuantifica la capacidad de un objeto para emitir radiación infrarroja en función de su temperatura. Es un parámetro

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

adimensional que oscila entre 0 y 1, donde el valor de 0 indica que el objeto no emite radiación infrarroja, mientras que un valor de 1 indica que es un emisor perfecto. Deriva del cociente entre la radiación emitida por una superficie y la emitida si esta fuera un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. La emisividad se encuentra influida por diversos factores, tales como la composición química del objeto, el acabado superficial y la temperatura. A modo de ejemplo, los metales pulidos suelen presentar una emisividad baja, mientras que los materiales con superficies rugosas poseen una emisividad elevada.

- Reflexión entendida como energía reflejada: capacidad de un material de reflejar la radiación infrarroja. Es obtenida del ratio entre la energía reflejada por la superficie y la energía incidente en esta.

### 7.2. Cadena de medida utilizada

Los componentes utilizados para la medición fueron:

- Cámara termográfica FLIR A6750sc MWIR, Ilustración 29, ficha técnica y manual [19], [20].
- Software FLIR ResearchIR Max, manual aplicado en el anexo 0
- Impresora JCR 600 [10]
- Probetas de ABS

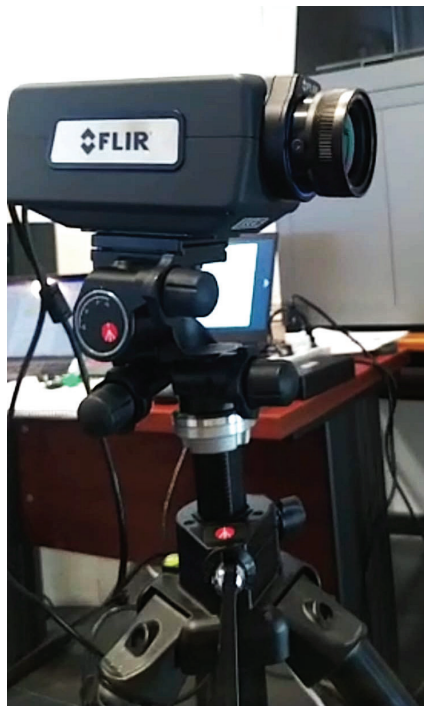


Ilustración 29. Cámara termográfica FLIR A6750sc MWIR sobre el trípode

### 7.3. Ensayos realizados y resultados

Se realizan dos ensayos. Una primera en la que se desea observar la velocidad de enfriamiento global de la pieza y la segunda referente a la curva de temperatura de un punto concreto respecto al tiempo.

#### 7.3.1. Calibración de la emisividad

Como se ha comentado anteriormente la emisividad es de vital importancia en un estudio termográfica por lo cual, a pesar de tener las emisividades de los materiales a medir tabuladas, se realizó una pequeña calibración previa al estudio.

Esta calibración consiste en, a una temperatura controlada, hacer corresponder los valores medidos por la cámara por los reales, comparados por la temperatura ambiente controlada.

Se procede cerrando ventanas y puertas y programando la climatización a una temperatura de 23°. Tras un tiempo considerable para permitir que todos los componentes alcanzasen la misma temperatura ambiente medida con un termopar de 23° se procede a la calibración. Variando la emisividad en el software FLIR ResearchIR Max hasta que la calculada por el software y la real coincidiesen, se usan como primeros valores orientativos los tabulados en la tabla proporcionada por FLIR para el vidrio [21] y los proporcionados por la base de datos del software Digimat para el ABS.

Es de mencionar la dificultad de la calibración debido al vidrio de la impresora que funciona como cama. Al ser un material que refleja, se debe tener especial cuidado para evitar medir la temperatura de los elementos reflejados en vez del propio cristal. Es por esta misma razón que todas las mediciones con la cámara termográfica se realizaron con la puerta de la impresora abierta, para que la lectura fuese lo menos alterada posible. De otra forma la medición estaría alterada por el posible reflejo de la puerta también de vidrio.

Los resultados obtenidos de la calibración son:

- Emisividad de la cama, vidrio 0,635
- Emisividad ABS 0.935

#### 7.3.2. Medición 1: Enfriamiento de un punto concreto durante la impresión

Para las mediciones se procede como en la calibración, con la puerta de la impresora abierta, el aire acondicionado para controlar la temperatura ambiente y se ajusta la emisividad de los materiales a la obtenida en la calibración.

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

Con esta medición se quiere observar el enfriamiento de un punto concreto de la probeta durante su extrusión y la influencia posterior de la fabricación de las capas superiores.

Para ello se procede escogiendo un punto de la probeta, mostrado en la Ilustración 30 (la imagen ha sido tratada para mostrar los puntos de interés y mejorar su comprensión) sobre el cual se tomarán los datos de la temperatura respecto al tiempo.

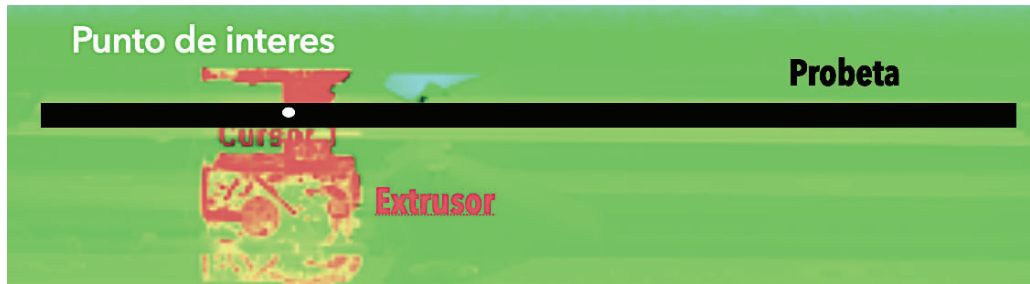


Ilustración 30. Punto de interés en el momento de extrusión, marcado por el Cursor 1.

Para la recopilación de dichos datos se ha realizado una grabación de 3 capturas simultáneas cada 15 segundos durante 7 minutos, 420 segundos durante la impresión de la capa donde se ubica el punto de interés y las dos superiores. De esta forma se obtiene una gran resolución y detalle de todo el proceso de fabricación de las tres capas consecutivas. La decisión de por qué se toman 3 capturas esta descrita en el epígrafe siguiente.

La Ilustración 31 muestra los resultados obtenidos durante dicha grabación, es decir, la variación de la temperatura respecto del tiempo del punto de interés (señalado en la Ilustración 31) durante la fabricación de tres capas consecutivas.

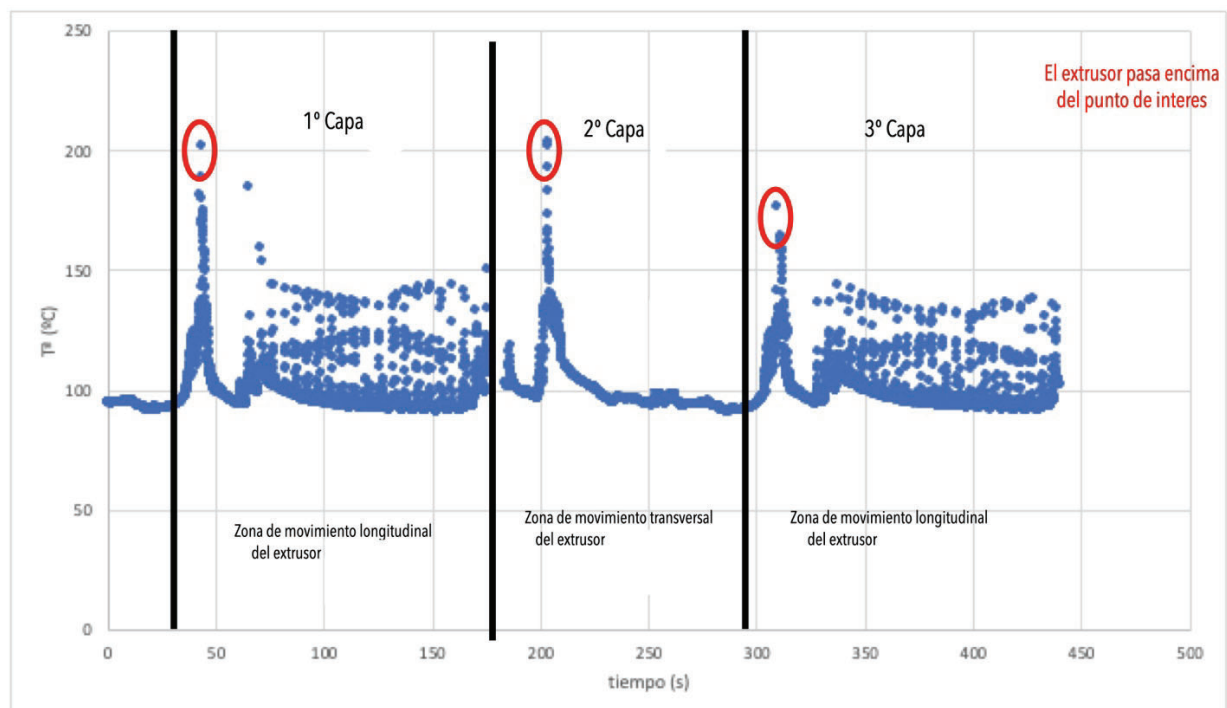


Ilustración 31. Resultados de la medición de temperatura de un punto concreto a lo largo del tiempo

Se puede observar en la Ilustración 31 que cada vez que el cabezal del extrusor pasa de nuevo sobre el punto para realizar una nueva capa (marcado en rojo) dicho punto eleva su temperatura cerca de los 200°C. Si bien, esta elevación de temperatura va disminuyendo conforme la capa a imprimir queda más alejada del punto de interés (se aprecia mejor entre la temperatura máxima de la 2ª capa y la de la 3ª capa).

Por otro lado, en las tres capas se observa que la disminución de temperatura una vez que el cabezal se ha alejado es muy rápido. En apenas 30 segundos la temperatura máxima de todas las capas ha disminuido de los 200°C hasta los 100°C, la temperatura de la cama de impresión.

Por último, se observa en las capas 1ª y 3ª una deformación que no se aprecia en la capa 2ª. En la Ilustración 33, Ilustración 34 e Ilustración 35 se observa con mayor detalle las gráficas de todas las capas. Esta deformación es debida al desplazamiento del extrusor al realizar la capa y la perspectiva en alzado de la cámara termográfica. La pieza se imprime en modo grid, es decir, una capa se realiza con movimientos longitudinales del cabezal, en dirección del eje X (siguiendo el sistema de coordenadas de la Ilustración 32) y la siguiente con movimientos transversales, en dirección del eje Z.

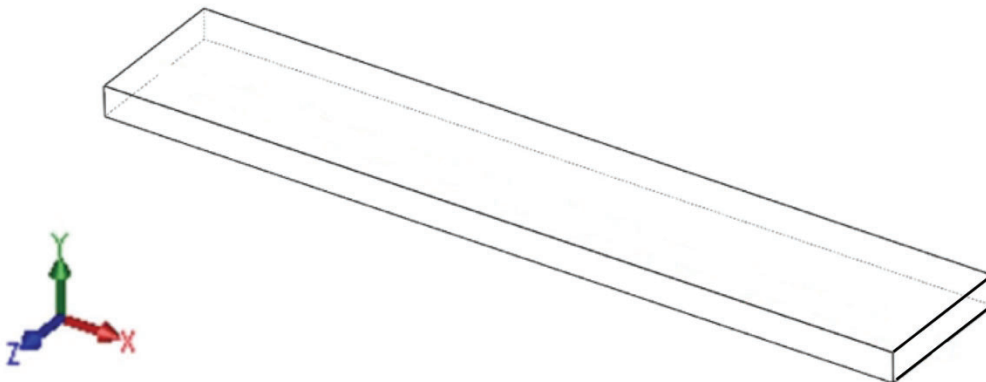


Ilustración 32. Probeta y ejes

Por ello, cada vez que el extrusor se desplaza longitudinalmente para fabricar cada línea de la capa, la perspectiva de la cámara capta el movimiento del extrusor prácticamente encima del punto de interés y recoge valores de temperatura elevados.

Sin embargo, en la 2ª capa el extrusor se desplaza transversalmente para fabricar cada línea de la capa por lo que tan solo pasa una vez por el punto de interés (visto desde el alzado). Esta es la principal diferencia entre las capas que se ve reflejada en las gráficas de temperatura/ tiempo.

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

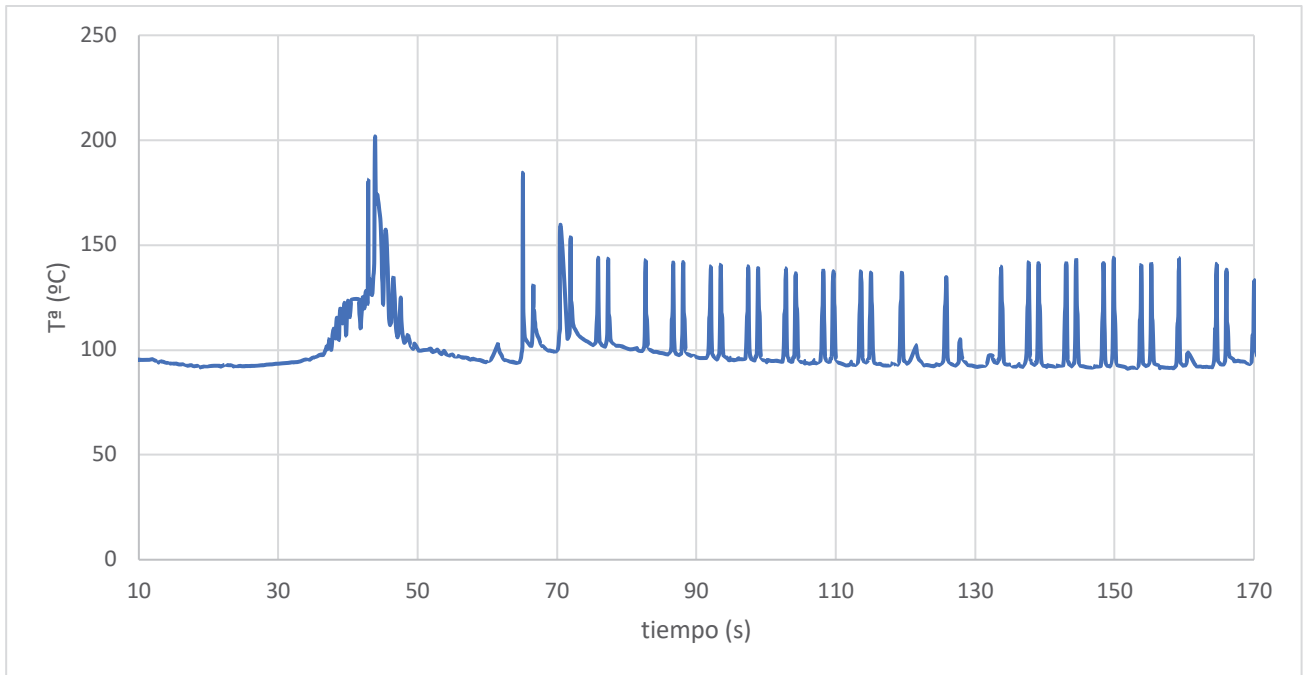


Ilustración 33. Variación de la temperatura de un punto concreto. 1ª Capa.

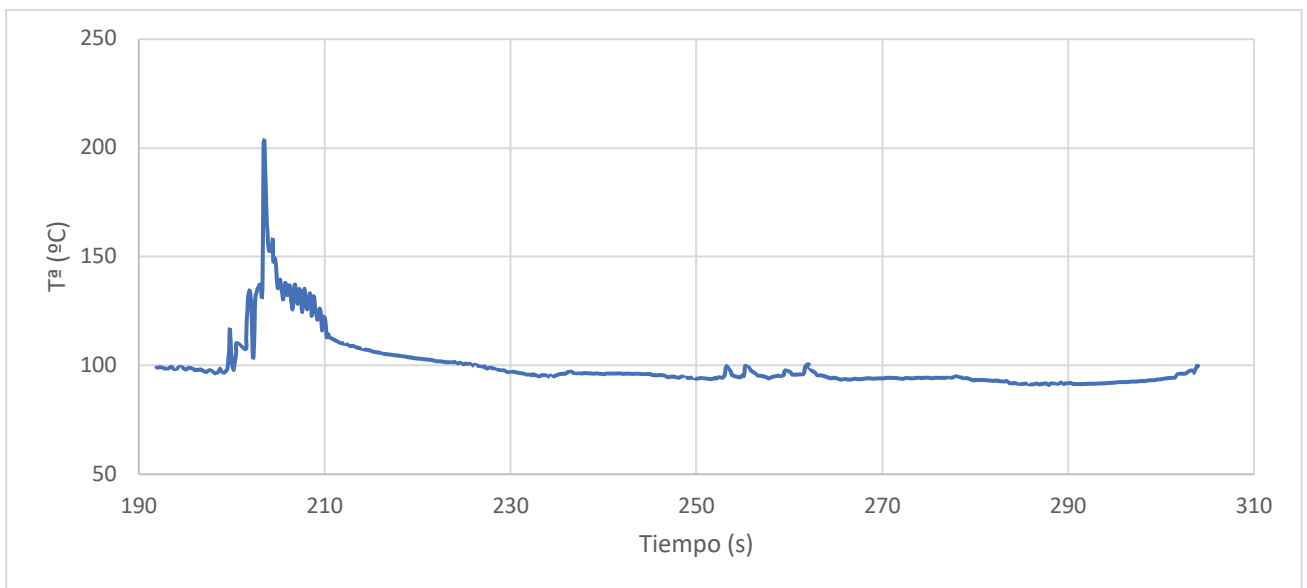


Ilustración 34. Variación de la temperatura de un punto concreto. 2ª Capa.

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

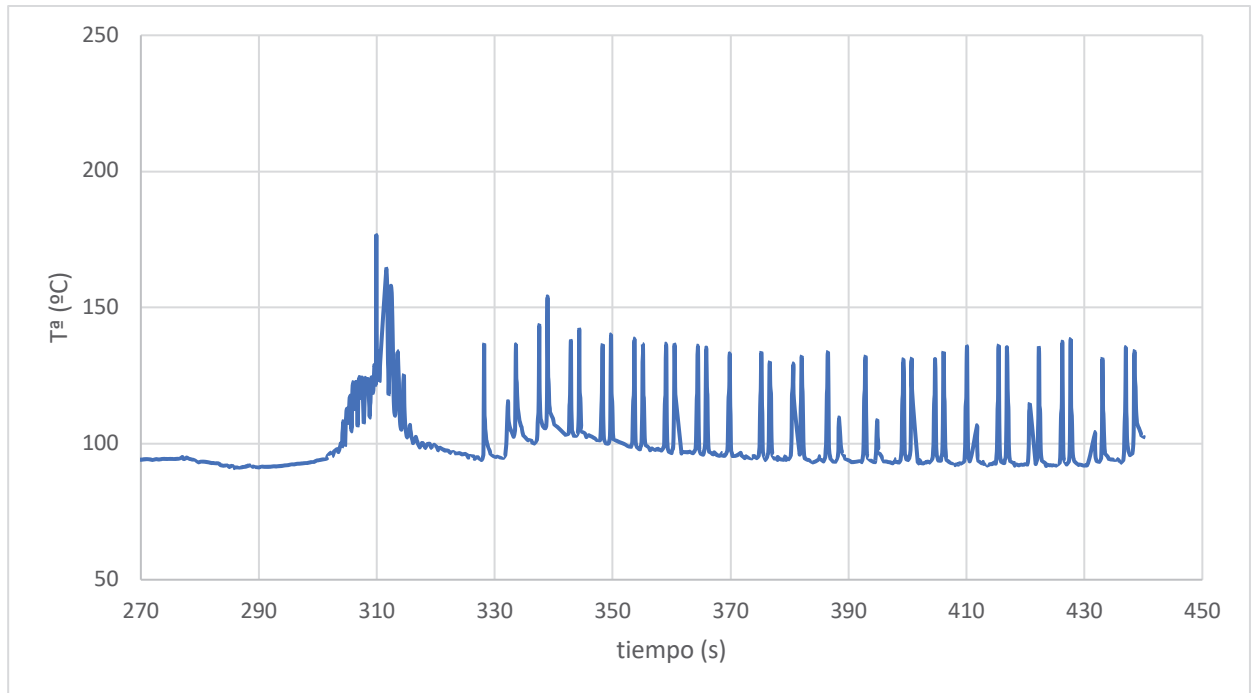


Ilustración 35. Variación de la temperatura de un punto concreto. 3ª Capa.

### 7.3.3. Medición 2: Enfriamiento global de la pieza

Para las mediciones se procede como en la calibración, con la puerta de la impresora abierta, el aire acondicionado para controlar la temperatura ambiente y se ajusta la emisividad de los materiales a la obtenida en la calibración.

Para observar el enfriamiento global de la pieza se escoge el proceso de enfriamiento tras la fabricación de una probeta de 100% de relleno rectilíneo a 0º y las temperaturas de interés serán (correspondientes a los elementos mostrados en la Ilustración 36):

- Temperatura de la cama de impresor (Line 2- azul).
- Temperatura de la primera capa de la probeta (Line 1 – rojo).
- Temperatura de la última capa de la probeta (Box 1 – verde).

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

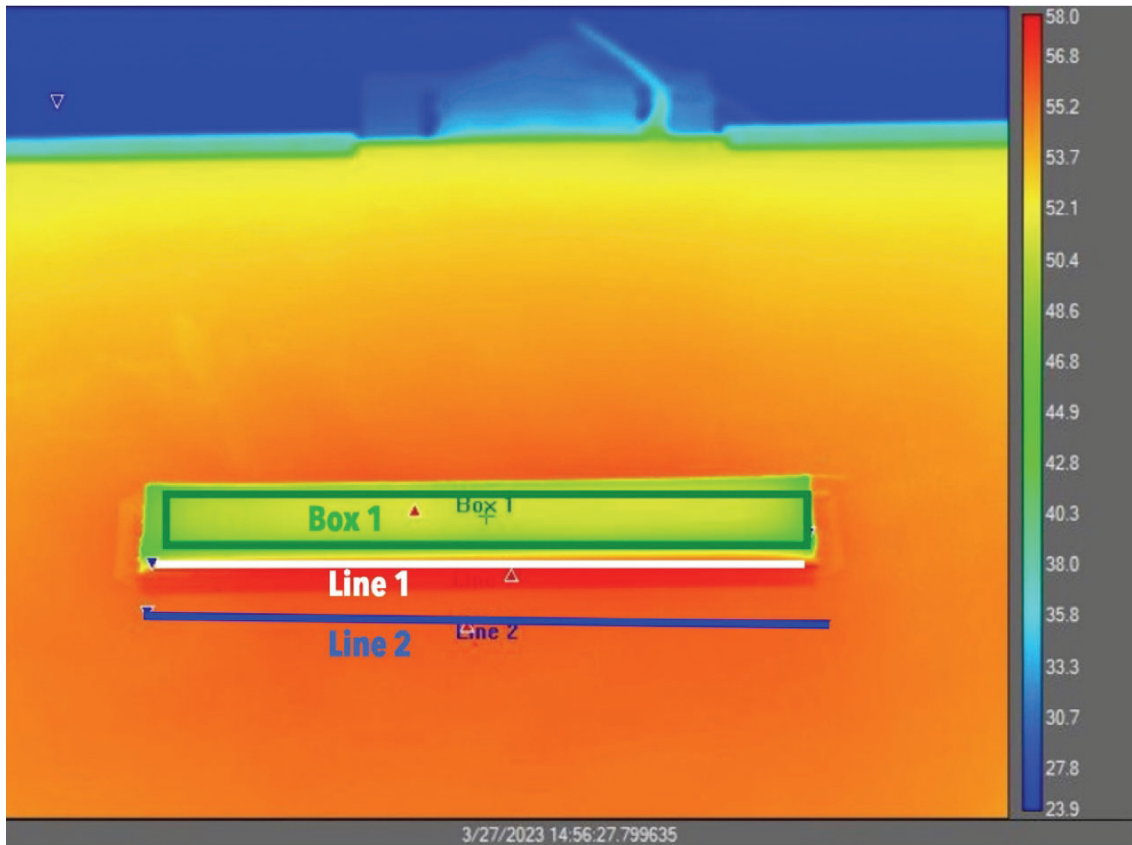


Ilustración 36. Captura de FLIR ResearchIR Max. Enfriamiento. Elementos de toma de datos en el programa

La recopilación de datos se realizó en dos grabaciones secuenciales de 15 minutos cada una: en la primera se tomaron 3 capturas simultáneas cada 15 segundos y en la siguiente se tomaron estas 3 capturas cada 30 segundos. De esta forma, se logra con bastante precisión la curva de enfriamiento de todos los elementos.

Se escogen 3 capturas simultáneas de diferentes intervalos de temperatura para obtener mayor resolución en el estudio. Aplicando la técnica "superframing" se permite capturar varias imágenes de diferentes espectros de temperatura simultáneamente para producir una sola imagen con una resolución final más alta. En otras palabras, es un proceso mediante el cual se combinan varias imágenes térmicas en tiempo real para crear una imagen de mayor resolución y detalle.

Los intervalos de temperatura de cada espectro son (en °C): 10-90, 80 – 200 y 150 - 300

Los valores numéricos obtenidos a partir de las grabaciones son la media de las temperaturas dentro de cada región, cuadrado o línea, frente al tiempo. Se observan en la gráfica de la Ilustración 37.

## 7. Medición de temperaturas

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

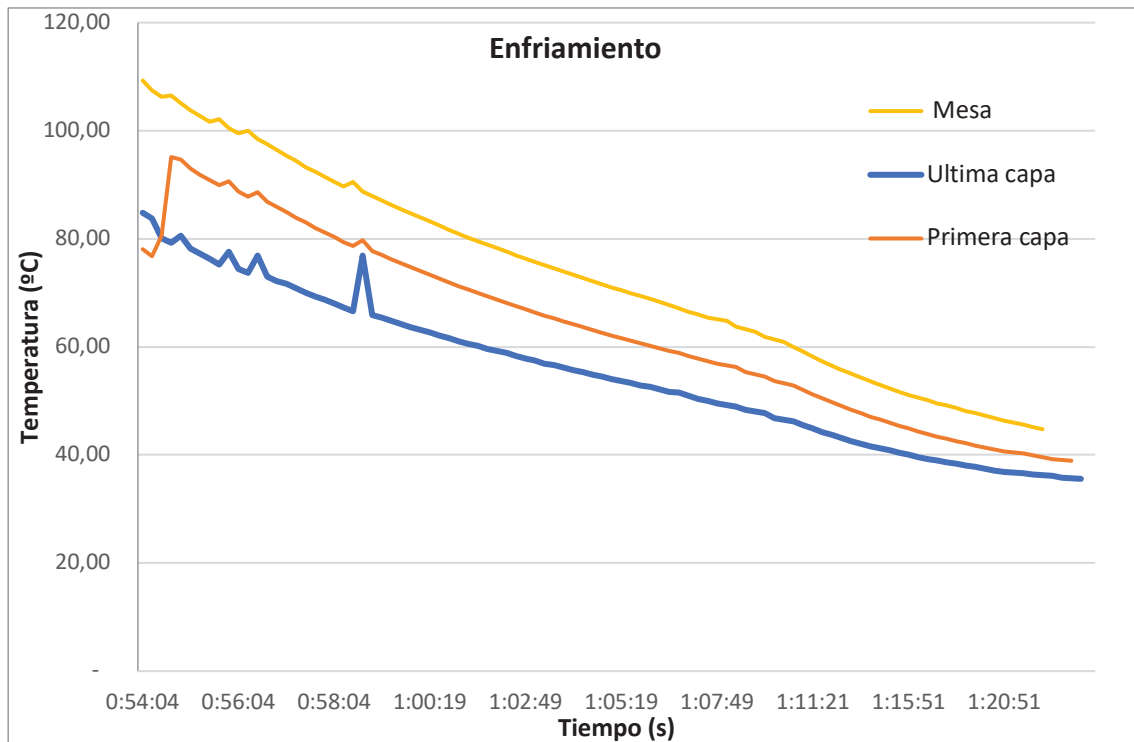


Ilustración 37. Gráfica enfriamiento global de la pieza al 100% de relleno y modo rectilíneo

En conclusión, se observa un decrecimiento exponencial aunque se puede asemejar a un comportamiento prácticamente lineal de la temperatura respecto del tiempo. Se observa además que la mesa de impresión es la que mantiene más alta la temperatura mientras que la última capa de la pieza es la que mantiene una temperatura inferior en todo el proceso de enfriamiento.

Esto nos lleva a concluir que probablemente es la cama es quien marca el ritmo de enfriamiento. Si bien el material podría enfriarse mucho más rápidamente, como se observa en la Medición 1 de este epígrafe, la cama tarda más en enfriarse y mantiene la temperatura global, haciendo que el descenso de la temperatura por convección con el ambiente sea más lento, con una duración total de media hora aproximadamente.



## 8. Medición de distorsiones

### 8.1. Metodología empleada

En esta medición se recogerán los datos de las deformaciones producidas durante el proceso de impresión de todas las probetas con variaciones en el porcentaje de relleno y con modo de impresión grid (cuadrícula).

Estos resultados están tomados en el centro de la pieza sobre una línea de interés. Esta está marcada en la Ilustración 38 como la línea de rayas roja, en la parte inferior de la pieza. El objetivo de la medición se centrará en la desviación máxima de esta línea en la dirección del eje Y frente a la horizontal.

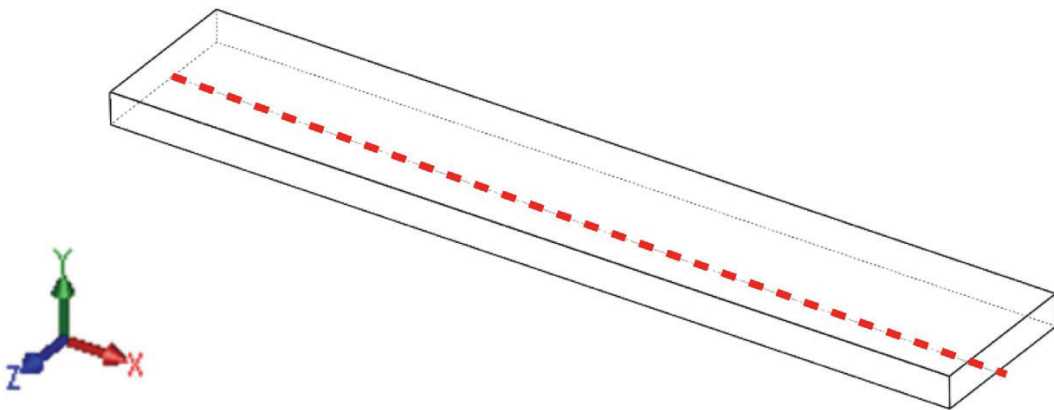


Ilustración 38. Línea de medición de la pieza. Imagen extraída del software SolidWorks.

Para observar las deformaciones producidas en las probetas se realiza una única medida en cada una de ellas en la parte central de la pieza, en la cara más lisa, es decir, la cara pegada a la cama en la impresión. En la Ilustración 39 se toman los datos de ambas caras de la probeta para decidir cuál presenta menor rugosidad y por tanto es más adecuada para medir la distorsión del plano medio.

La curva roja, con menor distorsión, es la cara en contacto con la cama de impresión. Esta cara es la escogida para medir el resto de las probetas. La curva azul presenta mayor distorsión al ser la cara “libre”, la última en ser impresa; la distorsión corresponde a los filamentos superficiales, a la rugosidad propia del acabado final de la última capa.

## 8. Medición de distorsiones

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

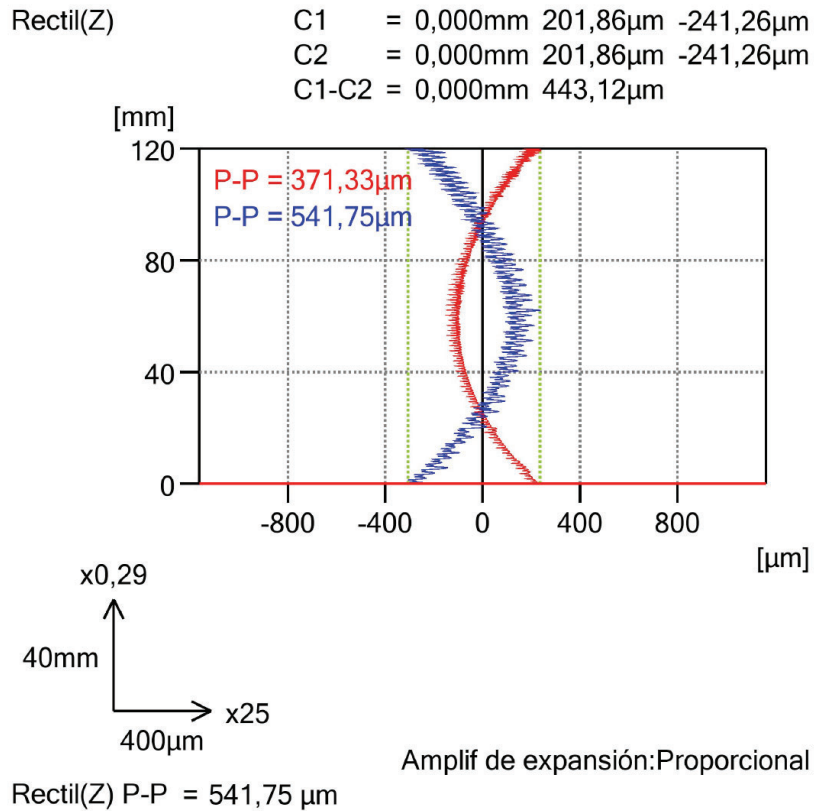


Ilustración 39. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 25 % de relleno.

### Cadena de medida

Se realizará una medición del error geométrico en rectitud con el medidor de forma RONDCOM NEX (resolución máxima de 0,001  $\mu$ m), mostrado en la Ilustración 40 y la colocación de la probeta dispuesta para la medición en la Ilustración 41



Ilustración 40. Medidor de forma RONDCOM NEX

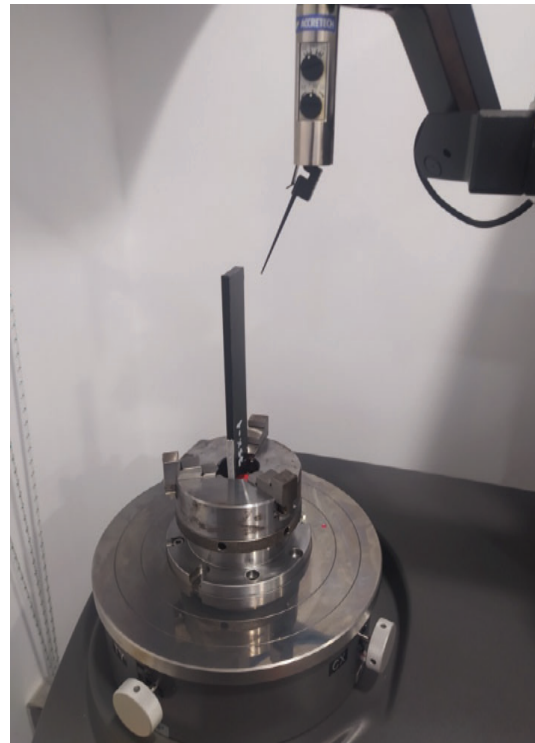


Ilustración 41. Palpador y probeta en el medidor de forma.

A diferencia de los TFGs anteriores de esta línea de investigación, no se ha utilizado el método del escáner 3D por varios motivos:

- Mayor precisión, el medidor de forma cuenta con una resolución máxima de  $0,001\mu\text{m}$  frente a los  $0,05\text{ mm}$  del escáner.
- Menor número de operaciones en la cadena de medida, lo que se traduce en menor posibilidad de errores de transferencia. Esta reducción de procesos de muestra en la Ilustración 42.

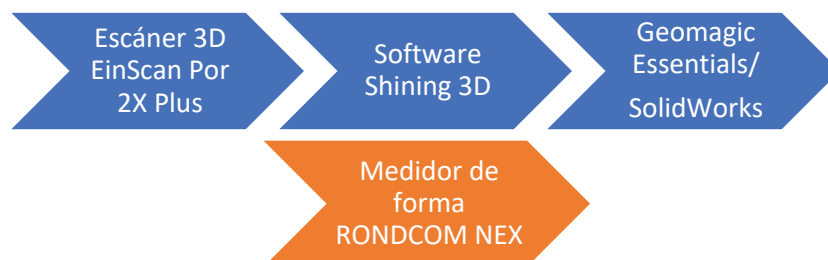


Ilustración 42. Comparativa de procesos.

- Mayor rapidez del método, mejorando la eficiencia del trabajo

Sin embargo, se deben resaltar algunas desventajas de este método:

## 8. Medición de distorsiones

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

- Un solo resultado por medición, mientras que con el escáner, una vez escaneada la pieza se puede medir con un software de procesamiento donde sea oportuno, con el medidor de forma se debe de realizar una medición para cada curva deseada.
- El palpador no llega a medir los extremos de la pieza, es decir, de los 160 mm de longitud de la pieza tan solo es posible medir 155 mm como máximo. Esto es debido a la colocación manual inicial del palpador con cierto margen hasta el soporte de sujeción.

### 8.2. Resultados.

El medidor de forma muestra los resultados observados en la Ilustración 43. La gráfica muestra la curva ajustada a la vertical entre las líneas verdes. Es de destacar que la orientación de la gráfica se debe a la posición de la probeta en vertical, se puede advertir mejor en la Ilustración 41.

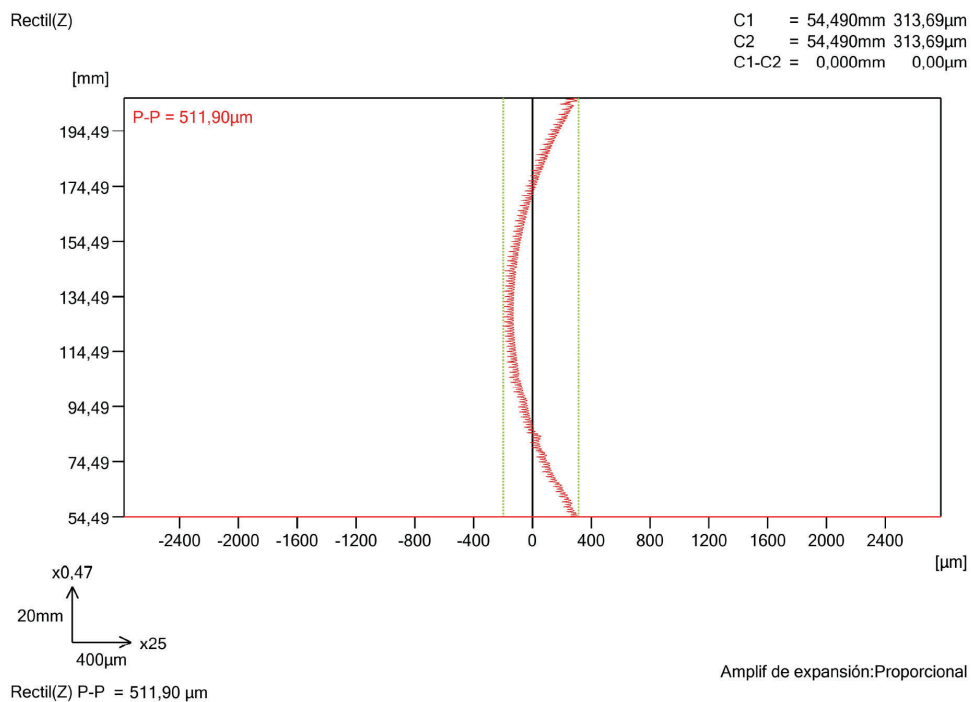


Ilustración 43. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno

Los valores finales recogidos son las desviaciones máximas de cada probeta. En la Ilustración 43 se observa en la esquina superior izquierda “P-P=511,90  $\mu$ m”, este resultado marca la distancia entre las líneas verdes. Este valor se ha usado como referencia, pero se ha calculado manualmente la desviación máxima de curva para evitar la rugosidad. La distancia tomada se muestra en la Ilustración 44, donde la línea azul marca la amplitud máxima por la izquierda sin rugosidad. Se obtienen unos resultados totales ligeramente inferiores a los resultados “P-P” sin tratar.

## 8. Medición de distorsiones

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

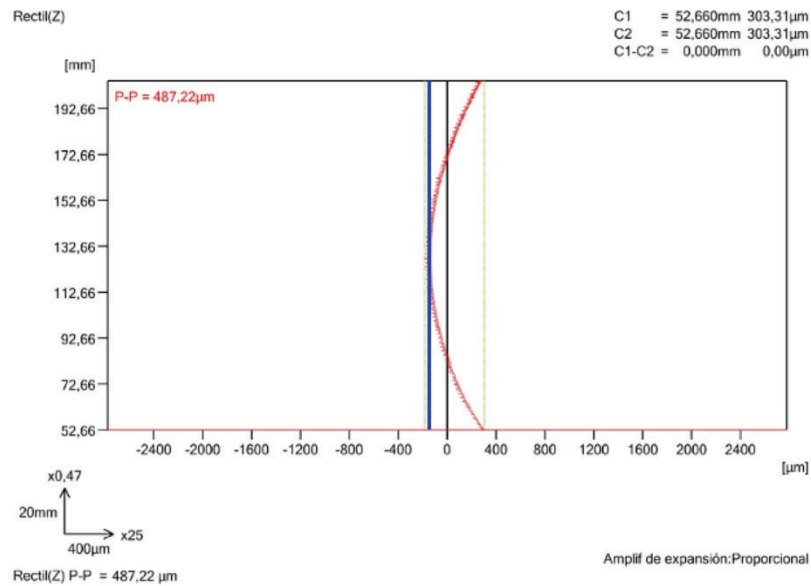


Ilustración 44. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno corregida

El resto de las gráficas de resultados se encuentran recogidas en el anexo 0.

En la

PROBETA	25%	50%	75%	100%
1 ( $\mu\text{m}$ )	371	381	452	401
2 ( $\mu\text{m}$ )	441	576	370	501
3 ( $\mu\text{m}$ )	518	478	364	306
Medida ( $\mu\text{m}$ )	435	465	392	387
DISPERSIÓN	73	98	49	97

Tabla 2 y la Ilustración 45 se muestran los resultados de cada modelo. Se recuerda que para cada porcentaje de relleno (25, 50, 75 y 100%) se han realizado tres probetas para poder observar la dispersión y continuidad de los resultados obtenidos.

PROBETA	25%	50%	75%	100%
1 ( $\mu\text{m}$ )	371	381	452	401
2 ( $\mu\text{m}$ )	441	576	370	501
3 ( $\mu\text{m}$ )	518	478	364	306
Medida ( $\mu\text{m}$ )	435	465	392	387
DISPERSIÓN	73	98	49	97

Tabla 2. Resultados medición de distorsiones

## 8. Medición de distorsiones

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

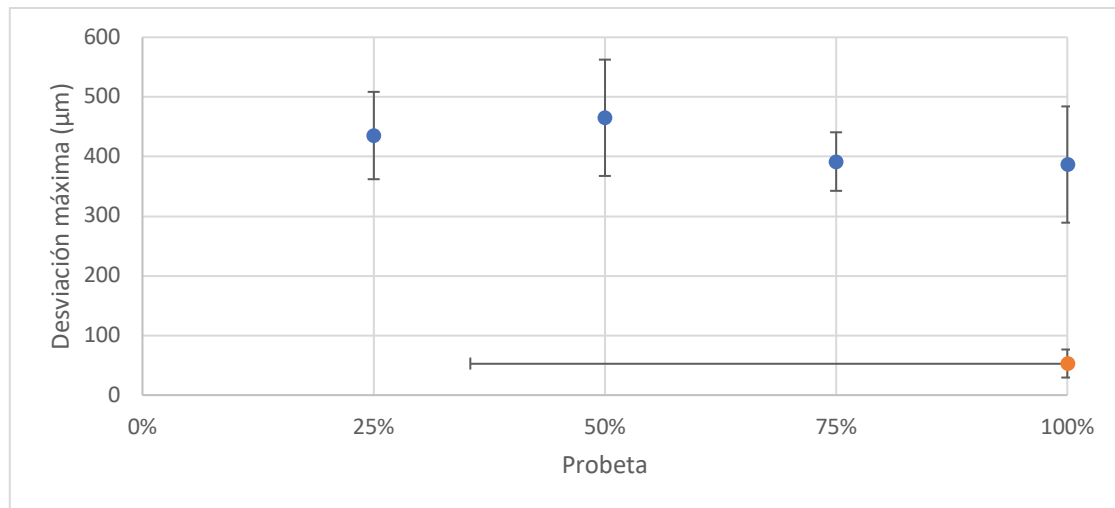


Ilustración 45. Gráfica medición de distorsiones

### 8.2.1. Conclusiones

Se observa que los resultados de las probetas están dentro del mismo orden de magnitud, sin embargo, las dispersiones son demasiado grandes.

Por ello se concluye que el parámetro de estudio, el porcentaje de relleno, no es tan influyente como para observar diferencias notables en la deformación de las probetas. Ya que todos los resultados en el mismo orden de magnitud.

Por último, se observa una gran dispersión entre las probetas, lo que implica una baja repetibilidad en el método de fabricación. Esto se puede observar a simple vista en la Ilustración 46, donde las probetas fotografiadas en la misma cara presentan menor (probeta 50-1) o mayor rugosidad (50-2) dependiendo del espécimen.



Ilustración 46. Comparativa a simple vista de las probetas 50-1 y 50-2



## 9. Simulación numérica del proceso de fabricación mediante elementos finitos.

En este apartado se describen las simulaciones realizadas para su posterior correlación con los resultados experimentales de la cámara termográfica y con los de la medición de distorsiones.

### 9.1. El problema termomecánico en Digimat

Para la simulación se usa el software Digimat AM, que realiza simulación por elementos finitos basándose en la capacidad de cálculo de Marc Mentat.

Para entender este software se presenta el problema teórico que este resuelve en el apartado 2.2. El programa usa las ecuaciones diferenciales del problema termomecánico y las resuelve para cada elemento de la malla. Las ecuaciones de dicho problema se muestran a continuación:

$$KT_{,jj} - \gamma T_0 \dot{u}_{j,i} = \rho c_p \dot{T} \quad (11)$$

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ij} - \gamma T_{,i} = 0 \quad (12)$$

Donde:

- T: temperatura
- $u_i$ : componente del desplazamiento según la coordenada i
- K: conductividad del material
- $\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha$
- $\alpha$ : coeficiente de dilatación térmica
- $\lambda$  y  $\mu$ : constantes de Lamé
- $T_0$ : Temperatura de referencia
- $\rho$ : densidad del material

$c_p$ : calor específico

### 9.2. Parámetros de simulación

Los parámetros generales de la simulación son los siguientes:

- Tipo de impresión: FFF
- Tipo de análisis: Warpage de alta fidelidad
- Material: ABS HxGN genérico sin efectos de relajación.
- Coeficiente de dilatación lineal de  $158 \mu m$ .

- Parámetros del proceso:
  - Temperatura del extrusor: 240 °C
  - Temperatura de la cama: 100 °C
  - Temperatura de la habitación: 23 °C
- Tamaño del Voxel de la malla: 0,5 mm
- Discretización: Capa a capa (mejor relación coste computacional – calidad final de los resultados)
- Control de salida:
  - Para el estudio de deformaciones:
    - Temperatura: Al final de cada capa
    - Desplazamientos: al final de capa
    - Tensiones residuales: mínimas
  - Para el estudio térmico:
    - Temperatura: Todas, máximas
    - Desplazamientos: al final de capa
    - Tensiones residuales: mínimas

Para más información acerca del software Digimat consultar el anexo 0 o el manual de usuario [22].

### 9.3. Resultados

#### 9.3.1. Deformación

Se desea analizar las deformaciones producidas durante el proceso de impresión de las piezas variando el porcentaje de relleno y con modo de impresión grid (cuadrícula).

Para obtener de estos resultados se ha extraído de Digimat la deformación de la malla. Se han recogido los desplazamientos en el eje Y de la línea de rayas rojas, Ilustración 47, tal y como se hizo en el apartado anterior, para así poder hacer la posterior correlación adecuadamente.

## 9. Simulación numérica

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

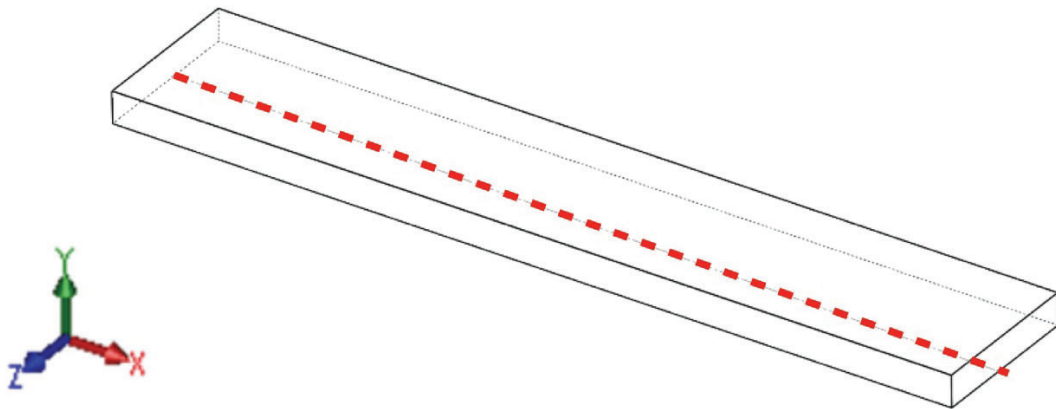


Ilustración 47. Línea de medición de la pieza. Imagen extraída del software SolidWorks

La deformación resultante de esta línea para cada uno de los porcentajes de relleno se encuentra representada en la Ilustración 48.

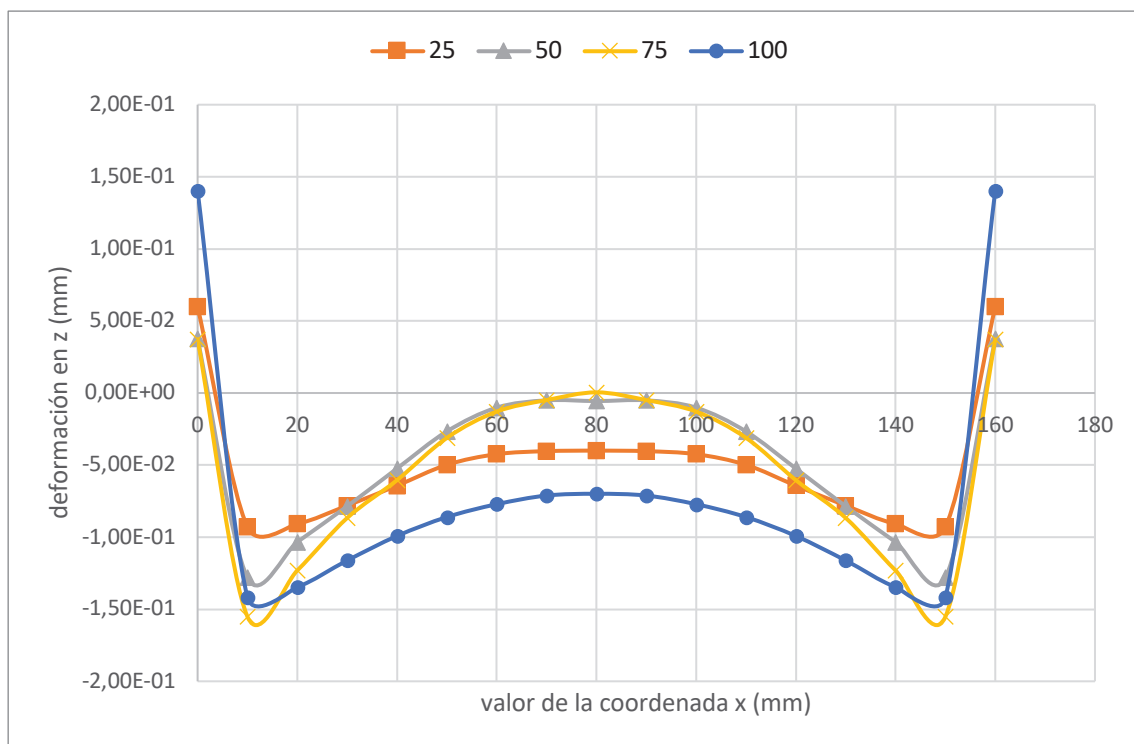


Ilustración 48. Resultados de la simulación. Comparativa de los distintos % de relleno

Para calcular la desviación máxima se ha ignorado los laterales puntiagudos de la gráfica ya que, como se explicó en el apartado 0, en la medición real no es posible medir los extremos. Además, esa desviación en los laterales tampoco es observada a simple vista en las probetas.

Se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 3 y la Ilustración 49.

## 9. Simulación numérica

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

PROBETA	25%	50%	75%	100%
DIGIMAT ( $\mu\text{m}$ )	53	123	156	72

Tabla 3. Resultados deformación máxima Digimat.

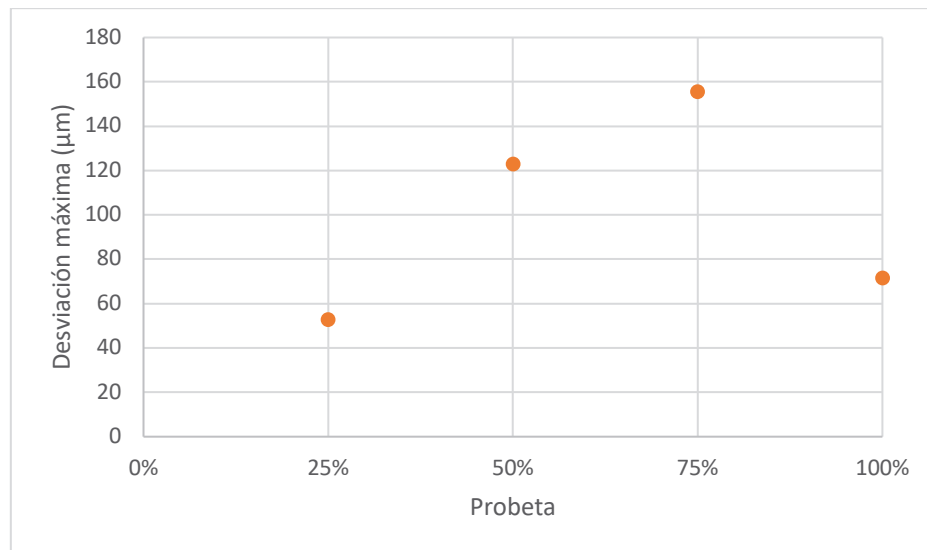


Ilustración 49. Gráfica resultada de la deformación máxima en Y

De estos resultados se puede concluir que no se mantiene el mismo orden de magnitud entre los distintos porcentajes de relleno y tampoco se cumple ninguna relación % de relleno/ deformación, contrariamente a la bibliografía.

Además, los extremos laterales presentan deformaciones inusuales. Por tanto, se determina que no se están teniendo en cuenta todos los parámetros necesarios para la correcta simulación.

### 9.3.2. Velocidad de enfriamiento y temperatura

Respecto a la temperatura se realizan dos simulaciones. Una referente a la velocidad de enfriamiento de la pieza y la segunda referente a la curva de temperatura de un punto concreto (nodo) respecto al tiempo.

Para observar el enfriamiento se escoge simular una pieza de 100% de relleno rectilíneo a 0° (igual que la probeta sobre la que se midió el enfriamiento real en el apartado 0) se escogieron los siguientes parámetros en el software:

- Tiempo de enfriamiento (cooling): 2000 s (aproximadamente media hora, es lo que tardó la pieza real en enfriarse).
- Numero de incrementos por capa: 6 (compromiso entre coste computacional y calidad de los resultados)

El enfriamiento de toda la pieza se muestra en la Ilustración 50. Se observa un descenso lineal de la temperatura con respecto al tiempo, desde la temperatura de la cama (100°C) hasta la temperatura ambiente (23 °C).

## 9. Simulación numérica

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

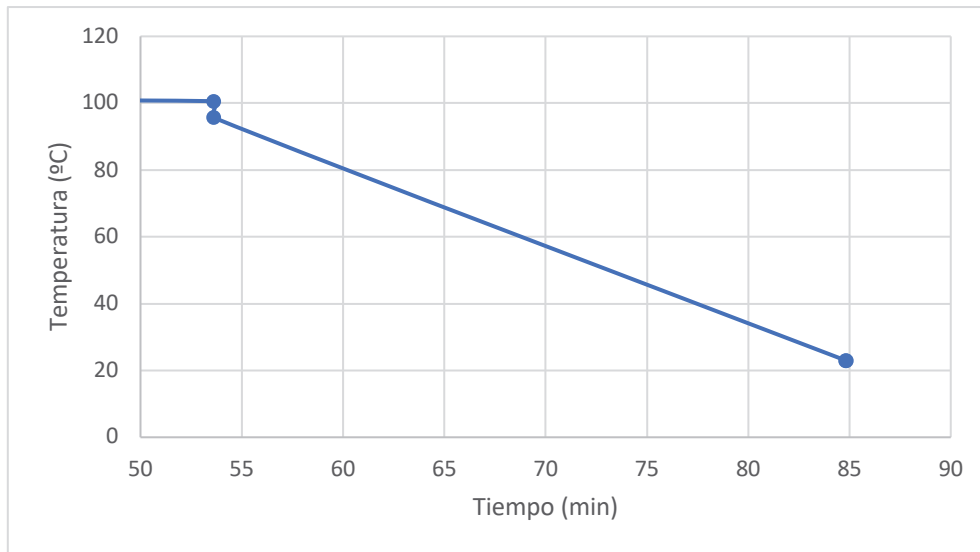


Ilustración 50. Enfriamiento simulado con Digimat

Por otro lado, se realiza la simulación de una pieza de 100 % de relleno, pero en modo grid (cuadrícula) a 0 y 90°, al igual que las probeta usada para la termografía de un punto concreto en el apartado 6. El nodo seleccionado, Ilustración 51, ha sido escogido lo más cercano al punto de la termografía real. Es de destacar que un nodo de la malla tiene una altura de 0,5 mm, mientras que la altura de capa de la pieza es de 0,25 mm por lo que un nodo representa una porción de dos capas adyacentes.

Position of Node 280535:  
Original (16.0000, 0.0000, 3.9999)  
After deformation (18.1627, 0.5788, 4.2389)

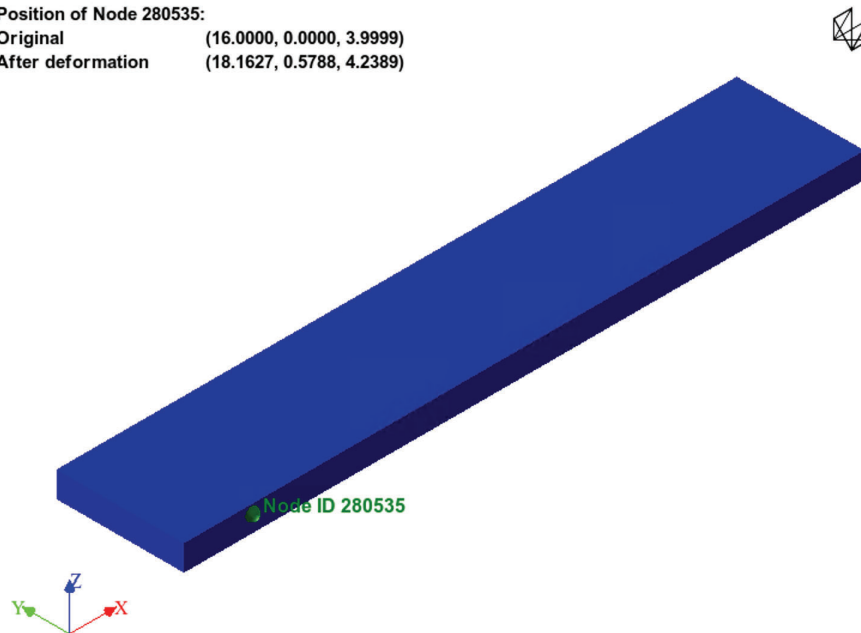


Ilustración 51. Nodo seleccionado en Digimat para la curva temperatura/ tiempo

En la Ilustración 52 se observan los resultados obtenidos de graficar la temperatura del nodo respecto del tiempo. El nodo comienza con una temperatura elevada de 240 °C

## 9. Simulación numérica

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

que corresponde con el momento de ser extruido, pero rápidamente, en apenas un minuto cae su temperatura hasta la temperatura de la cama, 100°C.

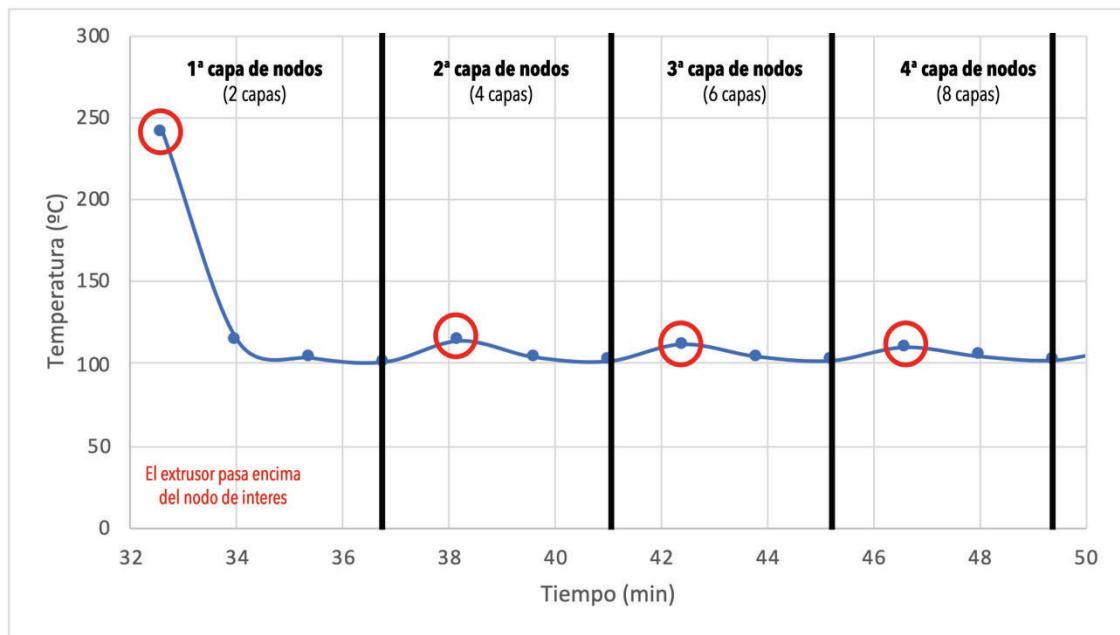


Ilustración 52. Curva temperatura/ tiempo de un nodo concreto

Se observan a continuación pequeñas oscilaciones (marcadas en rojo) cada 4 minutos aproximadamente, el tiempo que tardan en fabricarse 2 capas (o una capa de nodos). Estas ligeras elevaciones se deben a la fabricación de la capa superior justo encima del nodo en cuestión. Al pasar el extrusor y el material caliente sobre el nodo se eleva su temperatura hasta unos 114 °C. Aunque no se aprecia en la gráfica en la Tabla 4 podemos observar un ligero decrecimiento de la temperatura (marcadas en gris) conforme la línea de nodos en fabricación está más lejos del nodo escogido.

Tiempo (min)	Temperatura [°C]
33	240
34	114
35	103
37	101
38	114
40	104
41	101
42	112
44	104
45	102
47	110
48	104
49	102

Tabla 4. Tabla temperatura/ tiempo de un nodo concreto

## 9. Simulación numérica

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

En conclusión, el enfriamiento global una vez acabada la impresión tiene un decrecimiento lineal desde la temperatura de la cama inicial hasta la temperatura ambiente.

Por otro lado, la temperatura de enfriamiento del material es muy rápida y en poco tiempo se alcanza la temperatura de la mesa. La fabricación de las capas superiores tiene una leve influencia en la capa inferior (incremento de 13 °C de la capa inferior) que se va atenuando con las capas siguientes.



## 10. Correlación numérico-experimental

En este apartado se precede a discutir la correlación obtenida entre los resultados numéricos y los experimentales.

### 10.1. Deformaciones

En la Ilustración 53 se observa la relación entre los resultados experimentales (apartado 0) y los simulados (apartado 9.3.1). Se aprecia que no hay ninguna correlación evidente entre los resultados. No solamente no tienen el mismo orden de magnitud los resultados, sino que además, las líneas de tendencia no coinciden.

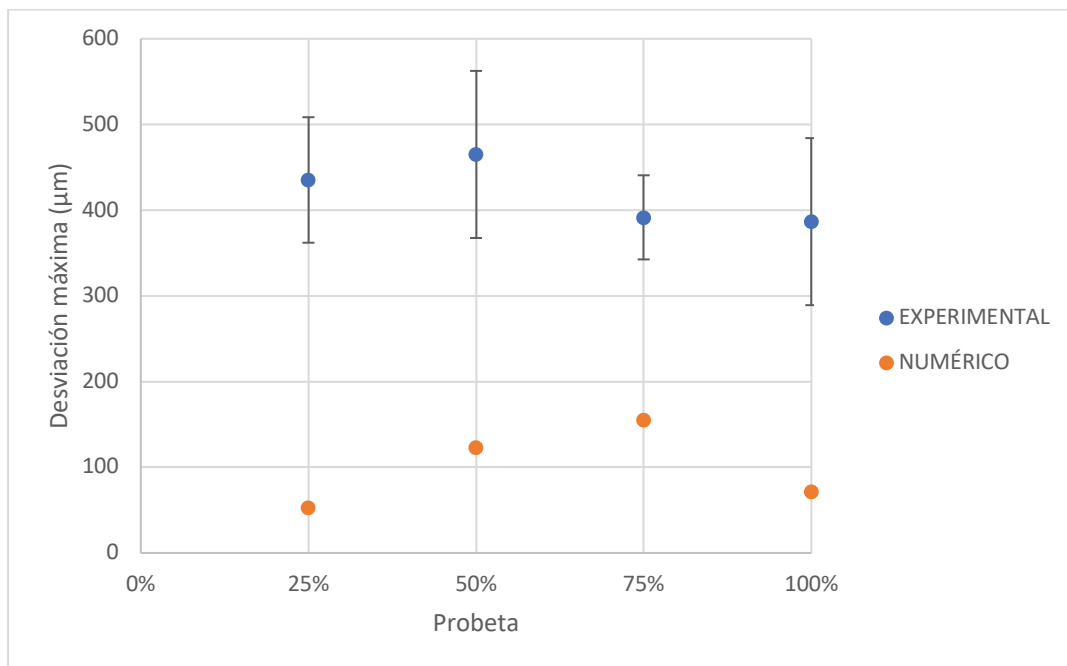


Ilustración 53. Resultados comparados de la deformación.

Por otro lado, el resultado experimental demuestra una baja influencia del parámetro estudiado (el porcentaje de relleno) frente a las deformaciones ya que todas las deformaciones están dentro del mismo orden de magnitud. Sin embargo, el resultado numérico presenta variaciones entre los especímenes de hasta cerca de tres veces su valor (entre la deformación del 25% y la del 75% hay un incremento de 53  $\mu\text{m}$  a 156  $\mu\text{m}$ ).

En conclusión, hay más parámetros en el estudio de la deformación de los que se están tomando en cuenta. Además, se deben revisar los métodos de obtención de datos tanto numérico como experimental.

## 10.2. Temperatura

## 10.2.1. Enfriamiento global de la pieza

Como se observa en la gráfica de la Ilustración 54 la correlación entre los resultados experimentales del enfriamiento de la mesa, ultima capa y primera capa con el resultado numérico es realmente buena. A pesar de que el resultado numérico es totalmente lineal frente a la ligera curvatura que se observa en los resultados experimentales la correlación es más que aceptable.

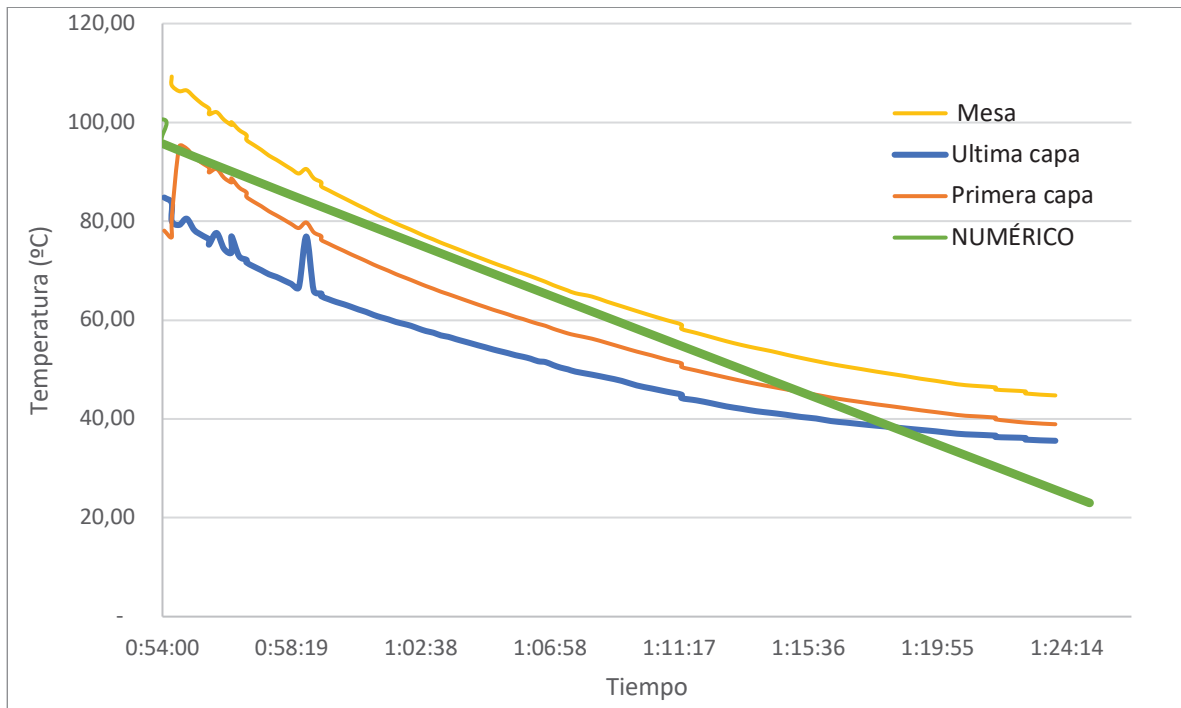


Ilustración 54. Comparativa enfriamiento global experimentales y numérico

Por tanto, se puede concluir que el enfriamiento global de la pieza es exponencial aunque se puede asemejar a un comportamiento prácticamente lineal con respecto del tiempo.

## 10.2.2. Enfriamiento de un punto concreto

Al observar la Ilustración 55, resultado experimental e Ilustración 56, resultado numérico se deben tener ciertas consideraciones en cuenta. Los resultados numéricos corresponden a la simulación de un nodo, que es el doble de la altura de capa, es decir, cuando se termina de fabricar una capa de nodos en la simulación, se termina la impresión dos capas reales. Es evidente pues que una capa de nodos tarda el doble que una capa real. Tras esta aclaración se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La velocidad de enfriamiento es rápida en ambos resultados, pero mientras que la simulación tarda 1 minuto aproximadamente en alcanzar la temperatura de la

## 10. Correlación numérico-experimental

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

cama, el resultado experimental la alcanza en apenas 15 segundos. Sin embargo, ya que el tiempo de fabricación de una capa de nodos corresponde al doble de una capa real, el tiempo de enfriamiento de un nodo de una capa de nodos también puede corresponder al doble de un punto de una capa real, dando como resultado un tiempo de enfriamiento simulado de 30 segundos.

- En ambas gráficas se observa la influencia de las capas superiores sobre el punto/nodo de interés con un aumento de la temperatura puntual, sin embargo, la repercusión en la simulación parece ser mucho menor. Aun así, en ambas se cumple un decrecimiento de la influencia con forme la capa está más alejada.

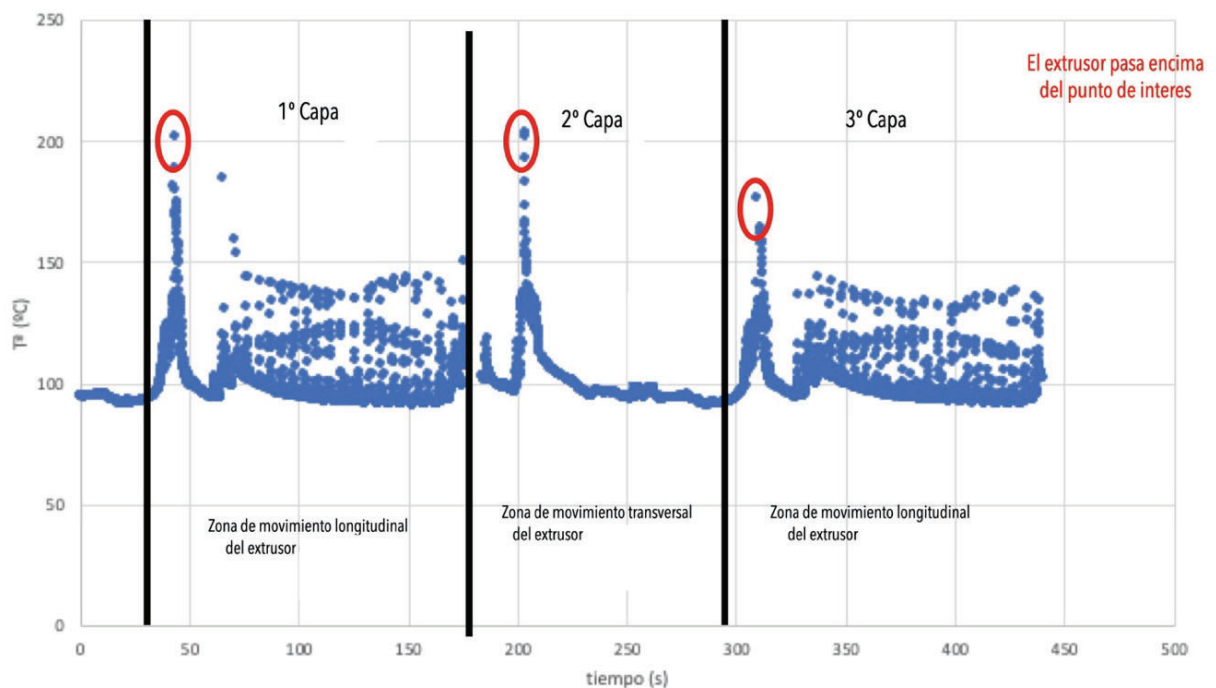


Ilustración 55. Resultados experimental de la medición de temperatura de un punto concreto a lo largo del tiempo

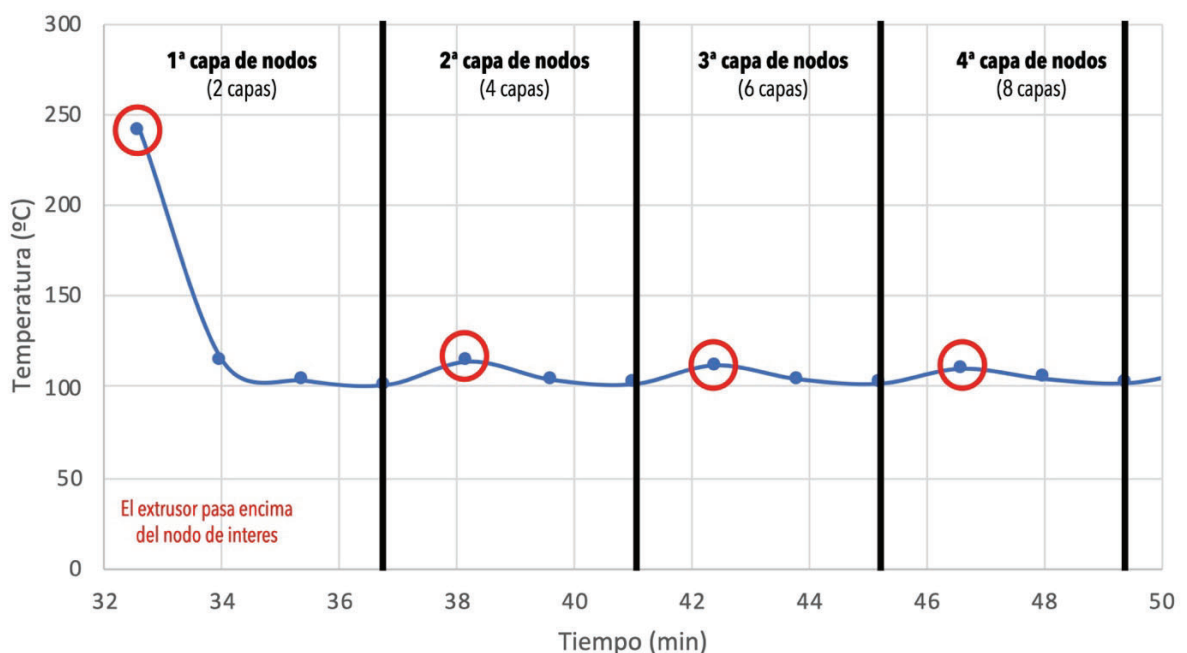


Ilustración 56. Curva temperatura/ tiempo de un nodo concreto numéricamente



## 11. Conclusiones

La fabricación aditiva de polímeros es un campo en constante evolución y se han llevado a cabo numerosos estudios para abordar el desafío de la relación entre la temperatura y las deformaciones en el proceso de fabricación.

En primer lugar, se ha medido el coeficiente de dilatación lineal  $\alpha = 158 \pm 4 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$  y este se mantiene constante dentro del rango de interés.

Posteriormente, tras haber realizado este TFG, se puede concluir que el proceso de fabricación no es lo suficientemente repetitivo ya que se obtienen resultados de distorsiones y calidades superficiales muy diferentes empleando los mismos parámetros de fabricación.

Por otro lado, se observa que el parámetro elegido para analizar su influencia sobre la distorsión, provocada dicha distorsión por las tensiones termomecánicas derivadas del proceso de fabricación, no ha sido concluyente.

Respecto a la simulación de la deformación, está claro que el modelo de elementos finitos obtiene deformaciones muy inferiores a las medidas experimentalmente, aunque no se han podido determinar sus causas.

Respecto a los estudios térmicos los resultados son más favorables.

Se ha obtenido una buena correlación numérico- experimental y se puede concluir que probablemente el enfriamiento global de la pieza está marcado por la velocidad de enfriamiento de la cama. Dicho enfriamiento es decreciente exponencialmente, aunque se puede asemejar a un comportamiento lineal con respecto al tiempo.

Por otro lado, el enfriamiento del material una vez depositado en la cama de impresión es bastante rápido (los resultados oscilan entre el experimental de 15 s y el numérico de 30 segundos), el material se enfría antes de que se acabe de fabricar el resto de la capa.

Respecto a la influencia que puede tener la impresión de las capas superiores en un punto de la capa inferior, no se ha llegado a una magnitud coincidente, pero definitivamente la impresión de las capas inmediatamente superiores incrementa la temperatura de la justo inferior. Este efecto se va atenuando conforme la capa superior impresa está más alejada.

Como conclusión general se puede decir que, si bien las correlaciones térmicas entre las simulaciones y las medidas experimentales han sido suficientemente buenas, no lo es así en el caso de las distorsiones, objeto principal de este trabajo.



## 12. Líneas futuras de investigación

Con objeto de seguir profundizando en el estudio de las deformaciones termomecánicas inducidas en los procesos de fabricación aditiva mediante fusión de filamentos poliméricos (FFF) se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Mejorar las condiciones del proceso de fabricación para, de esta forma, disminuir la dispersión de calidad en las probetas fabricadas.
- Seleccionar geometrías, condiciones de relleno y parámetros de fabricación, más apropiados para analizar su influencia sobre las deformaciones termomecánicas.
- Con respecto a la simulación numérica, compartir los resultados teórico-experimentales con la empresa desarrolladora del mismo (HEXAGON) para analizar las razones que pueden llevar a obtener las discrepancias obtenidas.
- Profundización en el método de medición de probetas tanto por escáner 3D como por el medidor de forma para comparar ambos resultados.
- Estudio considerando las propiedades viscoelásticas del material.
- Estudio en profundidad del software Marcmentat y posterior correlación con los resultados numérico- experimentales.



## 13. Referencias bibliográficas

- [1] J. García Mayorga, «Simulación y optimización del proceso de fabricación de polímeros mediante impresión 3D», TFG, UMA, Málaga, 2021.
- [2] J. C. De Castro Fernández, «Estudio numérico del acoplamiento termomecánico producido durante la fabricación de piezas mediante fusión de filamentos polímeros», TFG, Universidad de Málaga, Málaga, 2022.
- [3] J. A. Oriozabala-Brit, M. del M. Espinosa, y M. Domínguez, «Oportunidades de la fabricación aditiva para optimizar el diseño de productos», *Dyna (Medellin)*, vol. 91 n°3, pp. 263-271, may 2016.
- [4] Ángel Torres, «TFM. Caracterización geométrica mediante dispositivo láser de piezas poliméricas y metálicas obtenidas por fabricación aditiva con tecnología de deposición fundida.», *Jun*, 2022.
- [5] «UNE-EN ISO 17296-2:2017».
- [6] E. Valverde Lorenzo y A. Mansilla Gallo, «Análisis de la influencia de la temperatura de la cámara en piezas fabricadas por impresión 3D por la tecnología FFF», TFG, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2018. Accedido: 30 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31480/TFG-I-948.pdf?sequence=1>
- [7] «3DSourced Has Acquired Rigid. Ink - 3DSourced». <https://www.3dsourced.com/rigid-ink/> (accedido 30 de abril de 2023).
- [8] A. E. Ñauta Ñaura y R. M. Vergara Idrovo, «Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión 3D», Proyecto de Investigación y Desarrollo previo a la Obtención de Grado de Magister en Métodos Matemáticos Simulación Numérica en Ingeniería, Universidad politécnica Salesiana , Cuenca - Ecuador.
- [9] «3D Printable Infill Density Reference Display by Joseph Bosarte». <https://www.myminifactory.com/object/3d-print-infill-density-reference-display-94777> (accedido 30 de abril de 2023).
- [10] «Manual de seguridad e instrucciones Impresora 3D JCR 600».
- [11] «Puente de Wheatstone | José Casares». <https://josecasares.com/puente-de-wheatstone/> (accedido 7 de junio de 2023).
- [12] J. Meca, J. A. Jiménez, y E. Santizo, «Fco».
- [13] «Temperature Sensors and LST Networks Foil Temperature Sensors Foil Temperature Sensors». [End línea]. Disponible end: [www.micro-measurements.com1](http://www.micro-measurements.com1)
- [14] «Bondable Resistance Temperature Sensors and Associated Circuitry Strain Gages and Instruments».
- [15] «Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages Strain Gages and Instruments».
- [16] «Strain Gage Applications with M-Bond AE-10, AE-15 and GA-2 Adhesive System Instruction Bulletin B-137 Strain Gage Applications with M-Bond AE-10, AE-15 and GA-2 Adhesive Systems». [End línea]. Disponible end: [www.micro-measurements.com](http://www.micro-measurements.com)
- [17] «Strain Gage Applications with M-Bond AE-10, AE-15 and GA-2 Adhesive System Instruction Bulletin B-137 Strain Gage Applications with M-Bond AE-10, AE-15 and

- GA-2 Adhesive Systems». [En línea]. Disponible en: [www.micro-measurements.com](http://www.micro-measurements.com)
- [18] «Presentación Corta».
- [19] «FLIR A6750sc MWIR», 2015. [En línea]. Disponible en: [www.flir.com](http://www.flir.com)
- [20] «A6000 and A8500 Series User's Manual». [En línea]. Disponible en: <http://flir.custhelp.com>
- [21] «Emisividad Flir».
- [22] «Digimat 2022.4 AM User's Guide Digimat AM User's Guide», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://simcompanion.hexagon.com>
- [23] «¿Para qué sirve el Skirt, el Brim y el Raft?» [https://filament2print.com/es/blog/23\\_skirt-brim-raft.html](https://filament2print.com/es/blog/23_skirt-brim-raft.html) (accedido 30 de abril de 2023).
- [24] «Configurando Simplify3D "Infill" (4/10) - YouTube». [https://www.youtube.com/watch?v=m2r\\_OPjfukM](https://www.youtube.com/watch?v=m2r_OPjfukM) (accedido 30 de abril de 2023).
- [25] Siconova 3D, «Manual de usuario Simplify 3D. Modelos JCR 1000 & 600».
- [26] «ResearchIR 4 User's Guide ResearchIR User's Guide 2». [En línea]. Disponible en: [www.flir.com](http://www.flir.com)



## Anexos

1.	RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA .....	85
1.1.	Resultados de la toma de datos, deformación de las galgas .....	88
1.2.	Resultados del coeficiente de dilatación térmica tras los cálculos .....	89
2.	RESULTADOS DE MEDICIÓN DE DISTORSIONES .....	92
3.	MANUAL APLICADO: DIGIMAT .....	99
4.	MANUAL APLICADO: SIMPLIFY .....	106
5.	MANUAL APLICADO: FLIR RESEARCHIR MAX ORIENTADO A IMPRESIÓN 3D .....	115
5.1.	Inicio.....	115
5.2.	Ajustes iniciales.....	116
5.3.	Previsualización.....	117
5.4.	Captura de datos.....	118
5.5.	Proceso de recopilación de información a partir de las grabaciones realizadas .....	121

## Índice de ilustraciones

### 1. Resultados del coeficiente de dilatación térmica

Ilustración 59. Resultados toma de datos probeta 1 .....	88
Ilustración 60. Resultados toma de datos probeta 2 .....	88
Ilustración 61. Resultados toma de datos probeta 3 .....	89
Ilustración 62. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 1 .....	89
Ilustración 63. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 2 .....	90
Ilustración 64. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 3 .....	90
Ilustración 65. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 25 % de relleno. ....	92
Ilustración 66. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 25 % de relleno .....	92
Ilustración 67. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 25 % de relleno .....	93
Ilustración 68. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 50 % de relleno .....	93

### 2. Resultados de medición de distorsiones

Ilustración 69. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno .....	94
Ilustración 70. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno. Resultado no válido por distorsión en la probeta.....	94
Ilustración 71. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 75 % de relleno .....	95
Ilustración 72. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 75 % de relleno .....	95
Ilustración 73. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 75 % de relleno. ....	96
Ilustración 74. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 100 % de relleno. ....	96
Ilustración 75. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 100 % de relleno .....	97
Ilustración 76. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 100 % de relleno .....	97

### 3. Manual aplicado: Digimat

Ilustración 77. Pinting project. Digimat.....	99
Ilustración 78. Component. Digimat .....	100
Ilustración 79. Manufacturing. Digimat. ....	101
Ilustración 80. Solver. Digimat (derecha) .....	102
Ilustración 81. Material model definition. Digimat .....	103
Ilustración 82. Job submission. Digimat .....	104

### 4. Manual aplicado: Simplify

Ilustración 83. Captura de Simplify 3D. Interfaz de inicio .....	106
Ilustración 84. Captura de Simplify 3D. Cabecera del programa, File desplegado .....	107

Ilustración 85. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Extruder" .....	108
Ilustración 86. Soporte falda [23].....	108
Ilustración 87. Soporte Brim [23] .....	108
Ilustración 88. Pieza con Raft, más adecuado para materiales de difícil adhesión [23] .....	108
Ilustración 89. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Layer".....	109
Ilustración 90. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Infill" .....	110
Ilustración 91. Captura de Simplify 3D. Tipos de patrones de relleno .....	111
Ilustración 92. Tipos de relleno, de izq. a derc. y de arriba a abajo: Rectilinear, Grid, Triangular, Fast Honeycomb, Full Honeycomb y Wiggle. [24].....	111
Ilustración 93. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Temperature" .....	111
Ilustración 94. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Speed" .....	112
Ilustración 95. Captura de Simplify 3D. Interfaz final de impresión.....	112

### 5. Manual aplicado: FLIR Research IR Max orientado a impresión 3D

Ilustración 96. Captura de FLIR ResearchIR Max. Interfaz de inicio tras abrir la aplicación .....	115
Ilustración 97. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú para conectar la cámara.....	116
Ilustración 98. Captura de FLIR ResearchIR Max. Herramientas de visualización.....	116
Ilustración 99. Captura de FLIR ResearchIR Max. Parámetros para el cálculo de los objetos de estudio .....	117
Ilustración 100. Captura de FLIR ResearchIR Max. Opciones de la previsualización....	117
Ilustración 101. Captura de FLIR ResearchIR Max. Elección de la termografía a visualizar .....	118
Ilustración 102. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ruta de acceso a las herramientas de grabación.....	118
Ilustración 103. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ajuste de grabación .....	119
Ilustración 104. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ajuste de grabación periódicos ....	120
Ilustración 105. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, visión general .....	120
Ilustración 106. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, opciones de visualización de los resultados. ....	121
Ilustración 107. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, herramienta de selección de elementos en la imagen. ....	121
Ilustración 108. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, tabla de datos .....	121
Ilustración 109. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú de datos.....	122
Ilustración 110. Captura de FLIR ResearchIR Max. Selección de variables.....	123
Ilustración 111. Captura de FLIR ResearchIR Max. Gráfica de la función 1 .....	124
Ilustración 112. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú de opciones para guardar el gráfico. ....	124



## 1. Resultados del coeficiente de dilatación térmica

### 1.1. Resultados de la toma de datos, deformación de las galgas

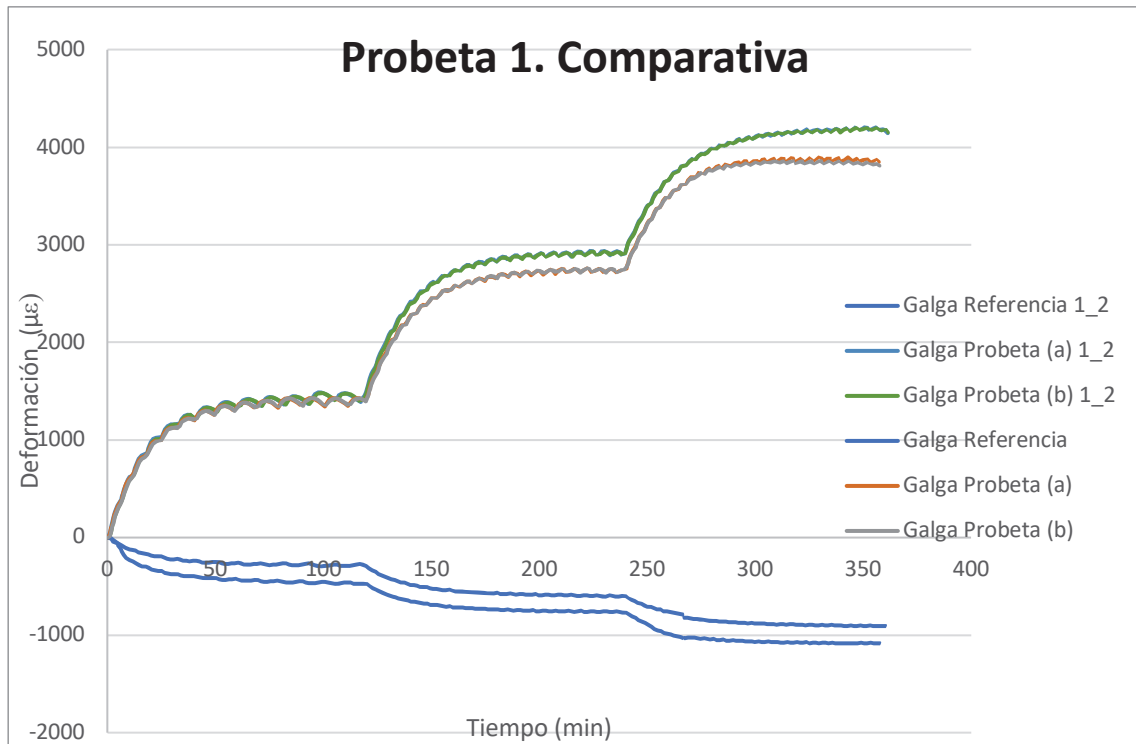


Ilustración 57. Resultados toma de datos probeta 1

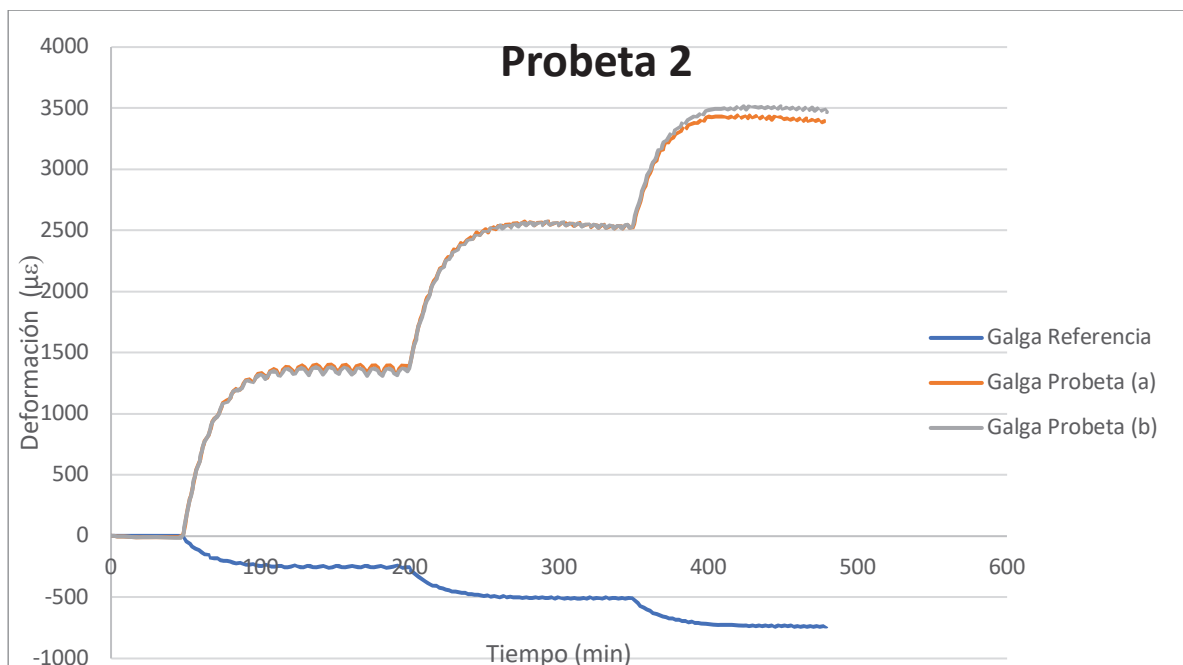


Ilustración 58. Resultados toma de datos probeta 2

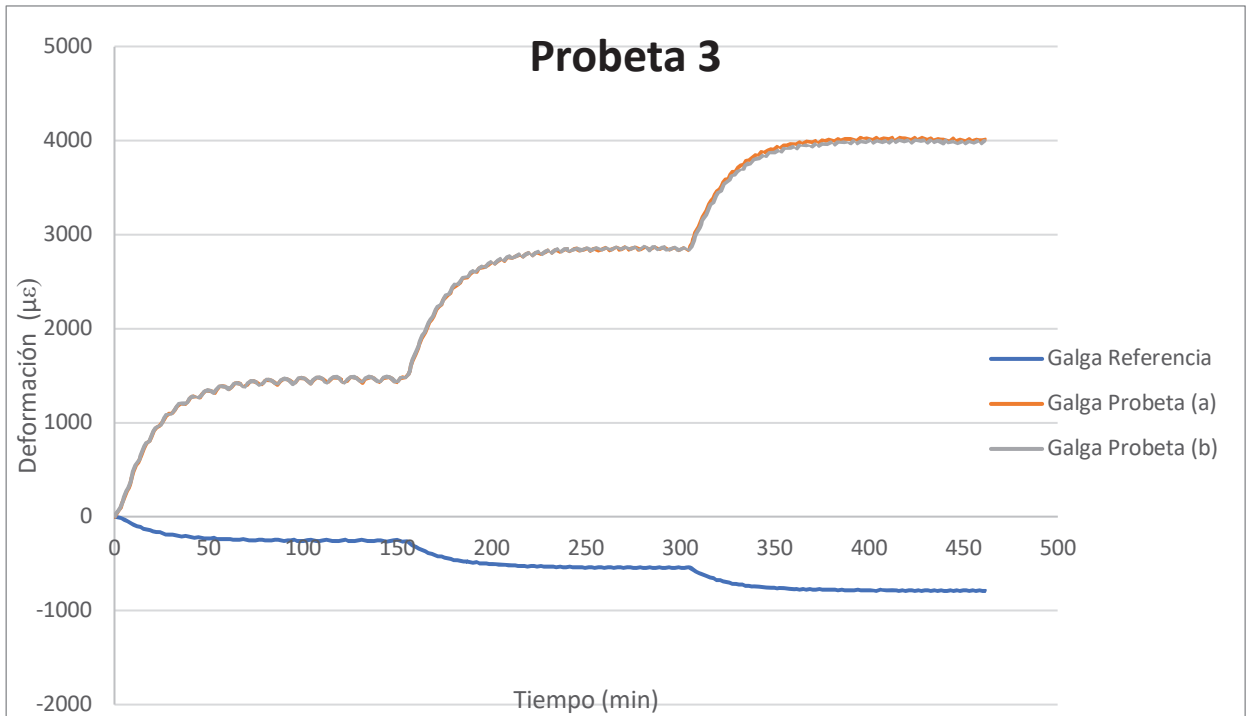


Ilustración 59. Resultados toma de datos probeta 3

1.2. Resultados del coeficiente de dilatación térmica tras los cálculos

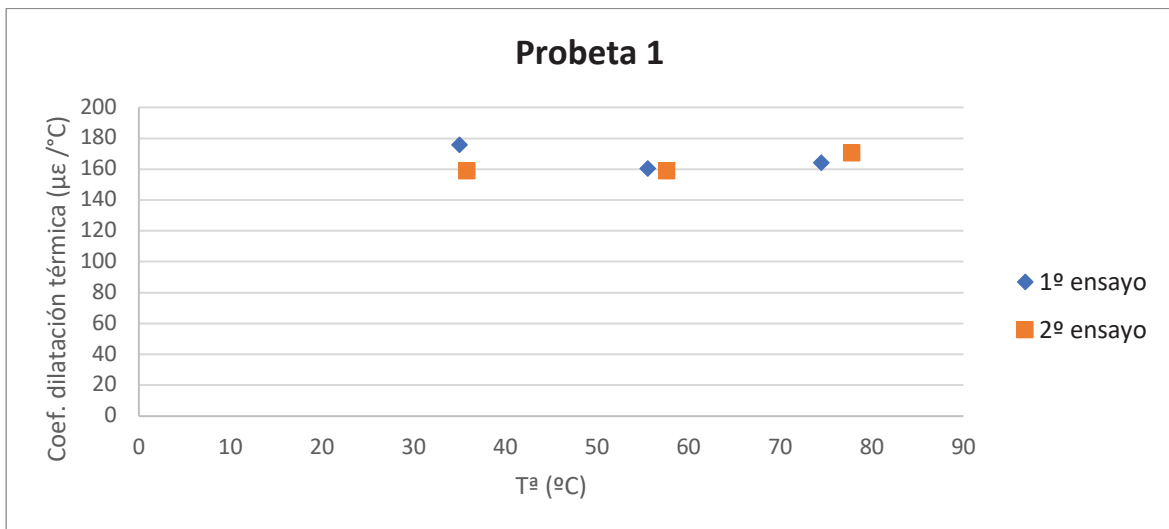


Ilustración 60. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 1

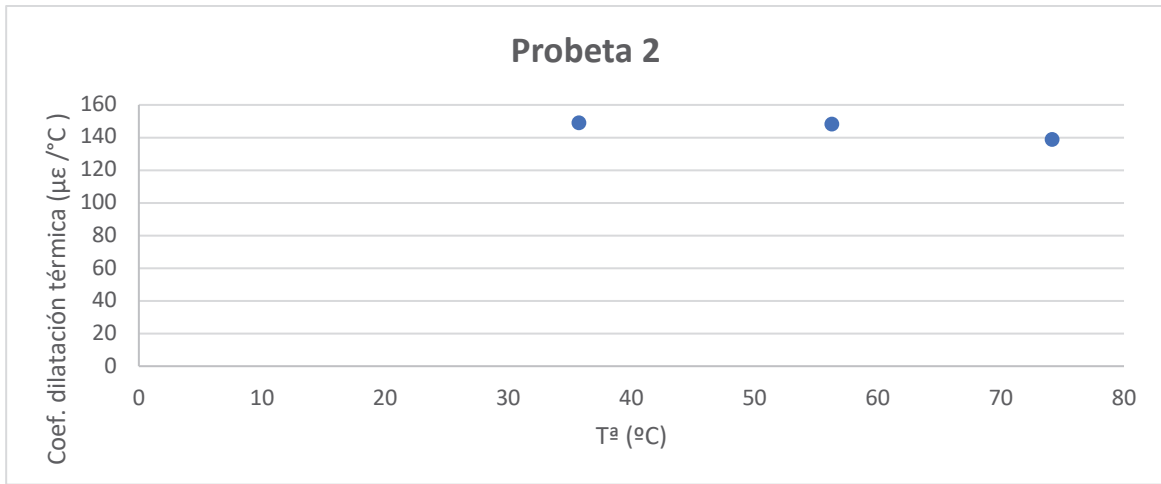


Ilustración 61. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 2

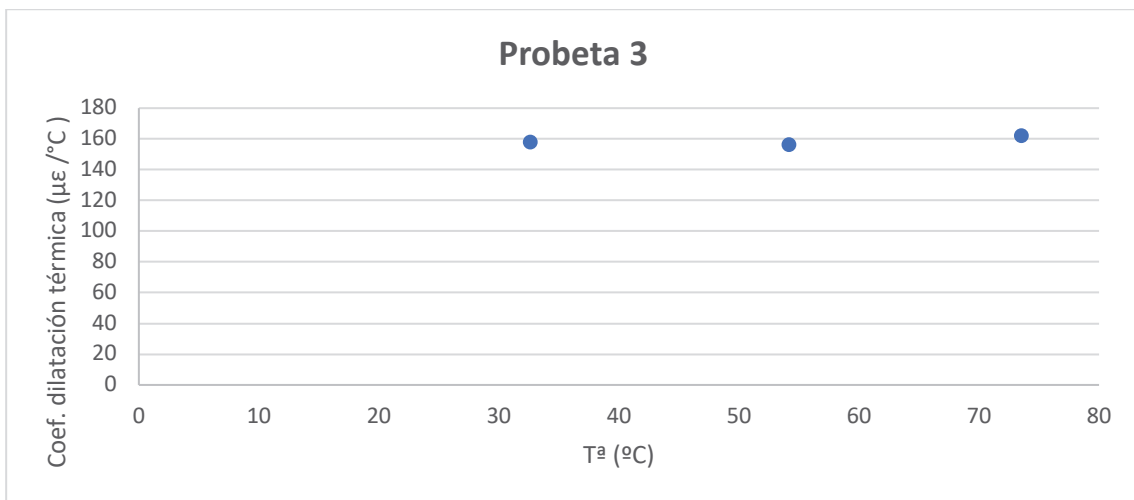
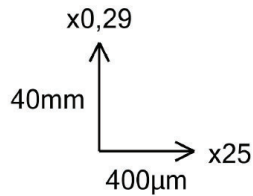
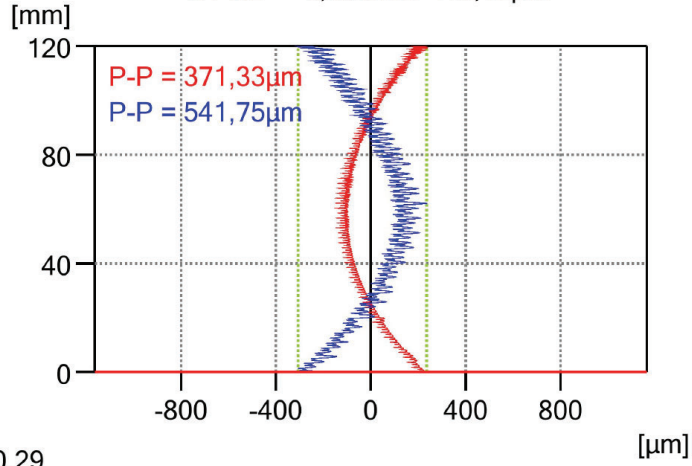


Ilustración 62. Resultados coeficiente dilatación térmica probeta 3



2. Resultados de medición de distorsiones

Rectil(Z) C1 = 0,000mm 201,86µm -241,26µm  
 C2 = 0,000mm 201,86µm -241,26µm  
 C1-C2 = 0,000mm 443,12µm

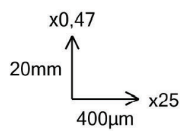
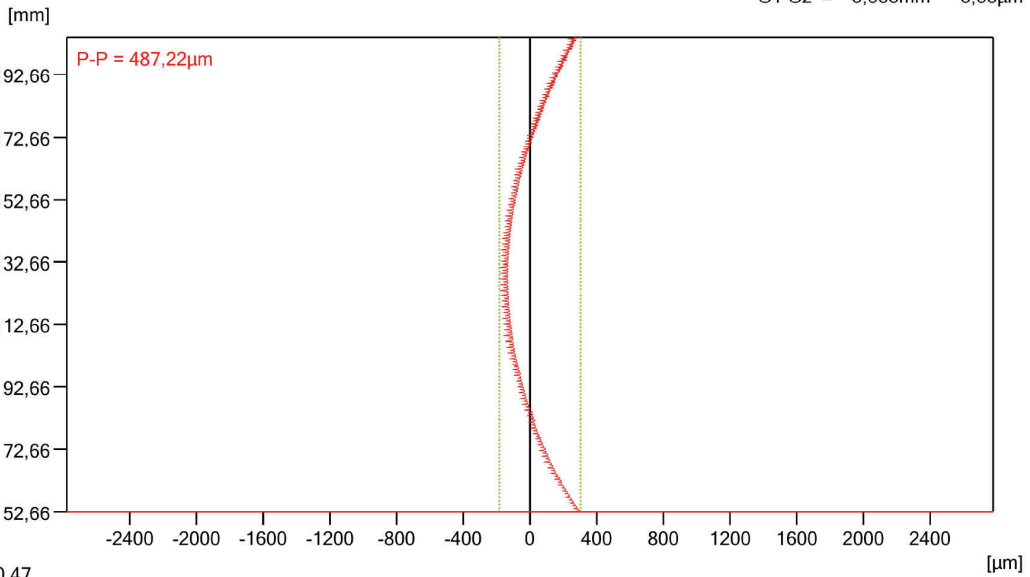


Amplif de expansión: Proporcional

Rectil(Z) P-P = 541,75 µm

Ilustración 63. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 25 % de relleno.

Rectil(Z) C1 = 52,660mm 303,31µm  
 C2 = 52,660mm 303,31µm  
 C1-C2 = 0,000mm 0,00µm



Amplif de expansión: Proporcional

Rectil(Z) P-P = 487,22 µm

Ilustración 64. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 25 % de relleno

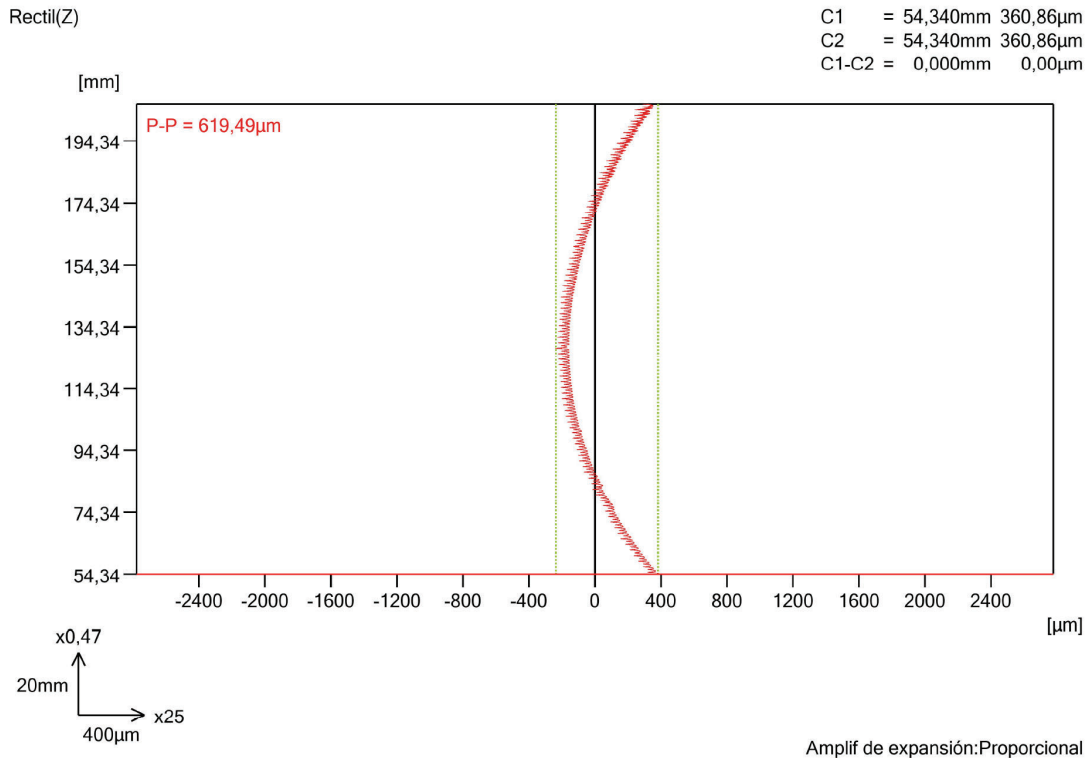


Ilustración 65. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 25 % de relleno

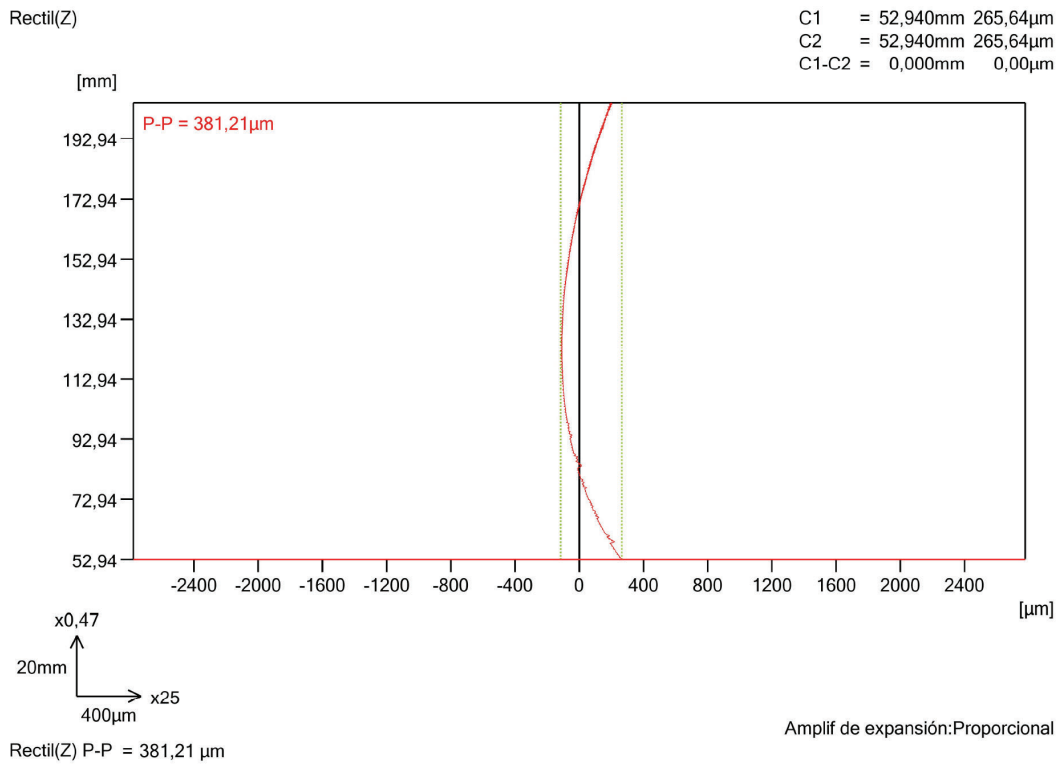


Ilustración 66. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 50 % de relleno

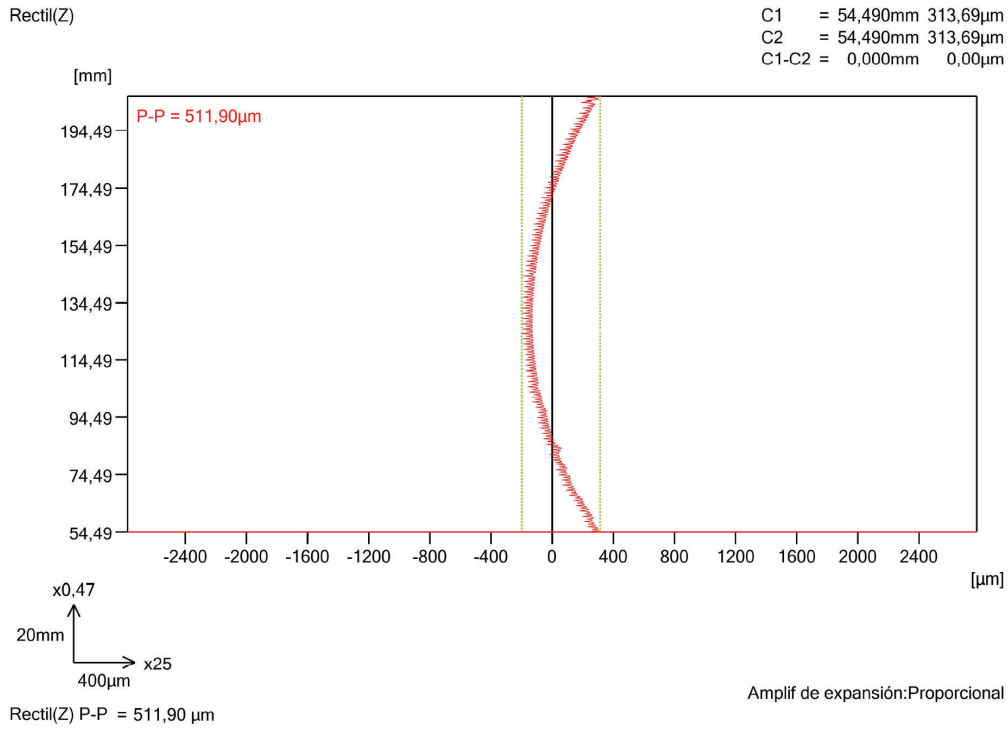


Ilustración 67. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno

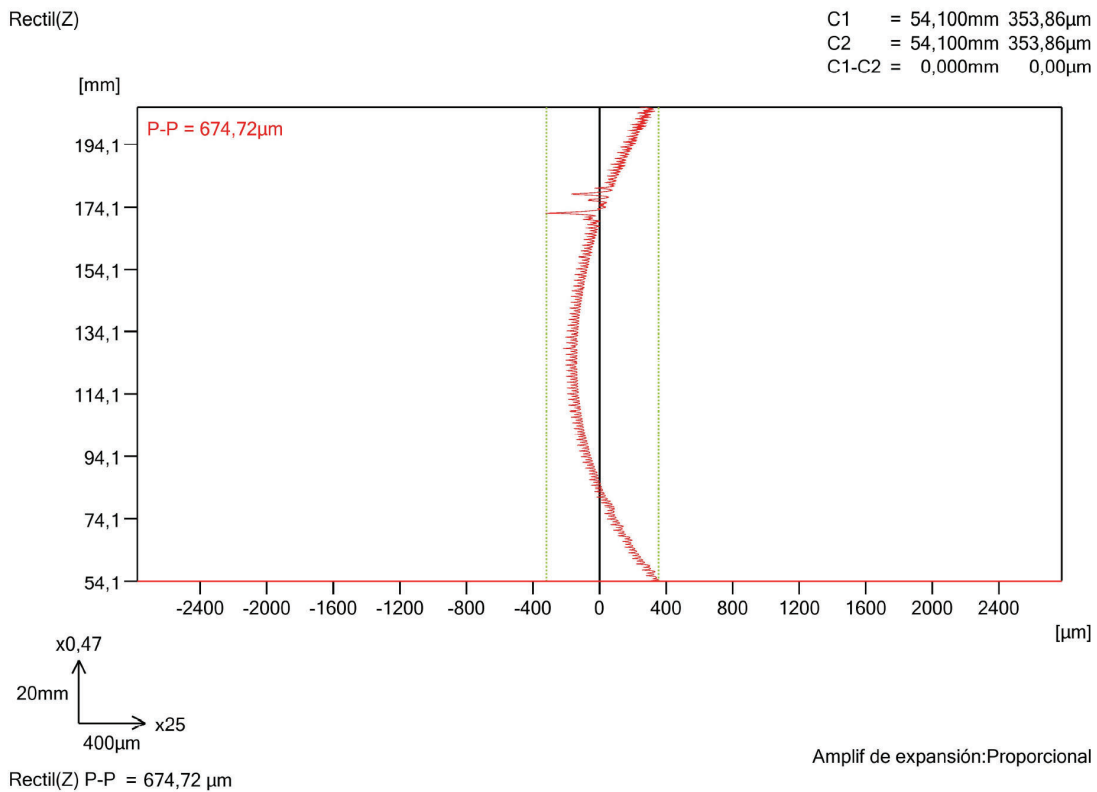


Ilustración 68. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 50 % de relleno. Resultado no válido por distorsión en la probeta.

# Anexos

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

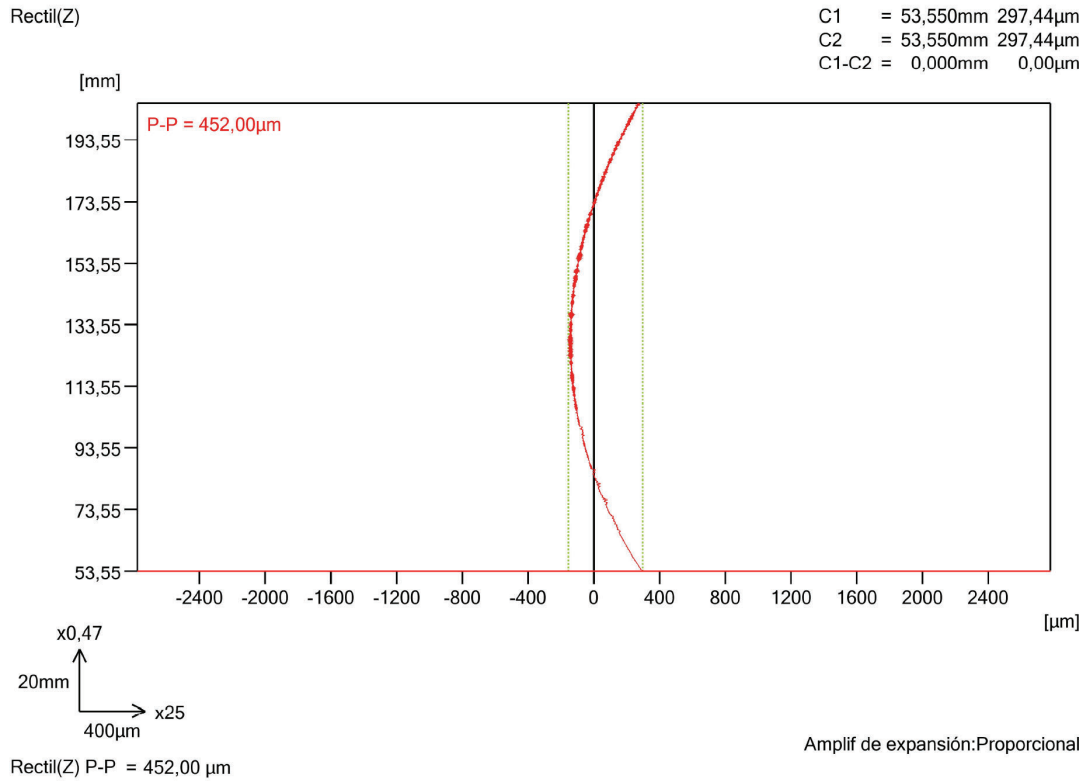


Ilustración 69. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 75 % de relleno

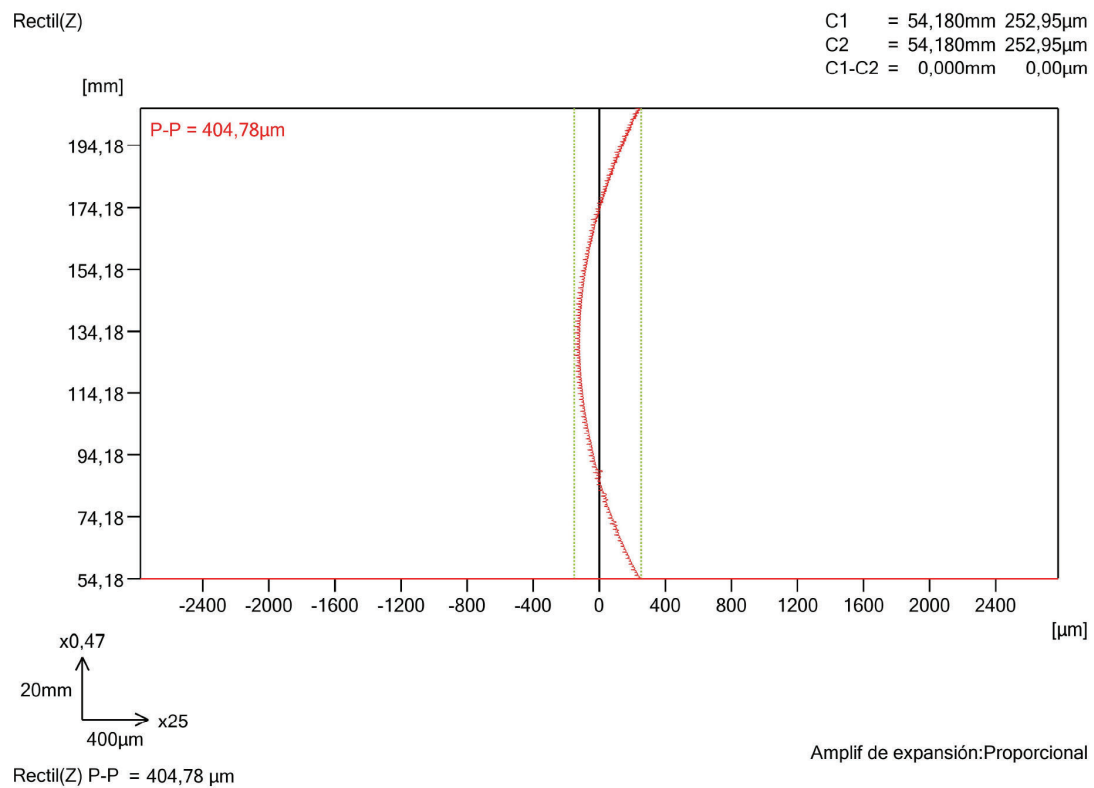


Ilustración 70. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 75 % de relleno

# Anexos

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

Rectil(Z)

C1 = 52,760mm 240,90µm  
 C2 = 52,760mm 240,90µm  
 C1-C2 = 0,000mm 0,00µm

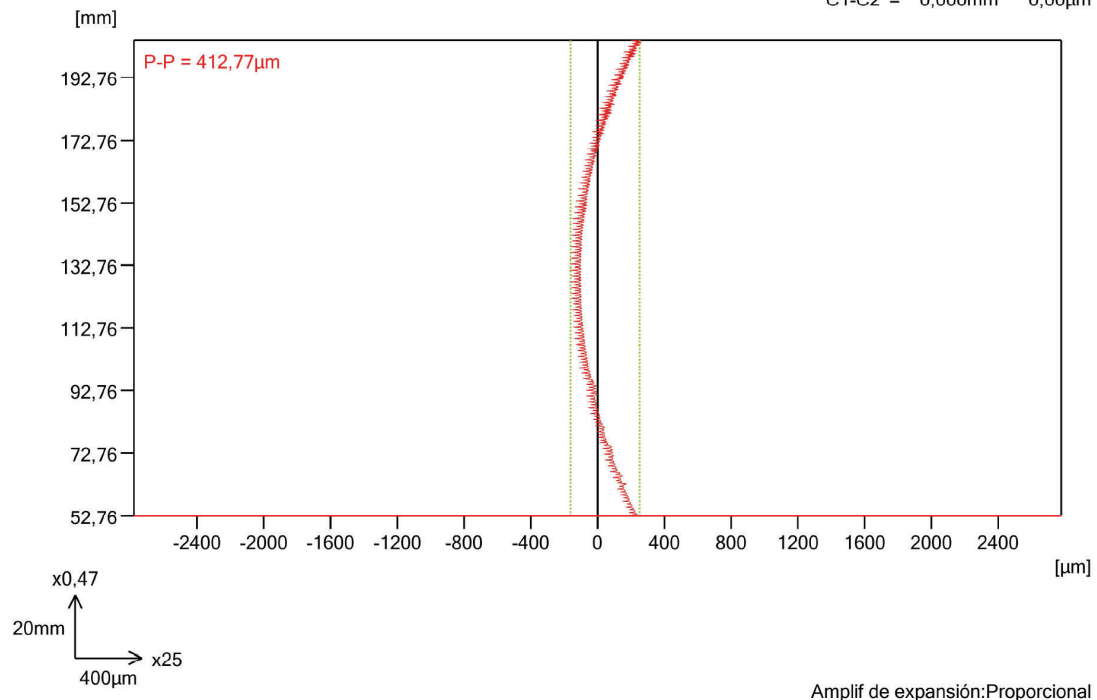


Ilustración 71. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 75 % de relleno.

Rectil(Z)

C1 = 53,510mm 264,37µm  
 C2 = 53,510mm 264,37µm  
 C1-C2 = 0,000mm 0,00µm

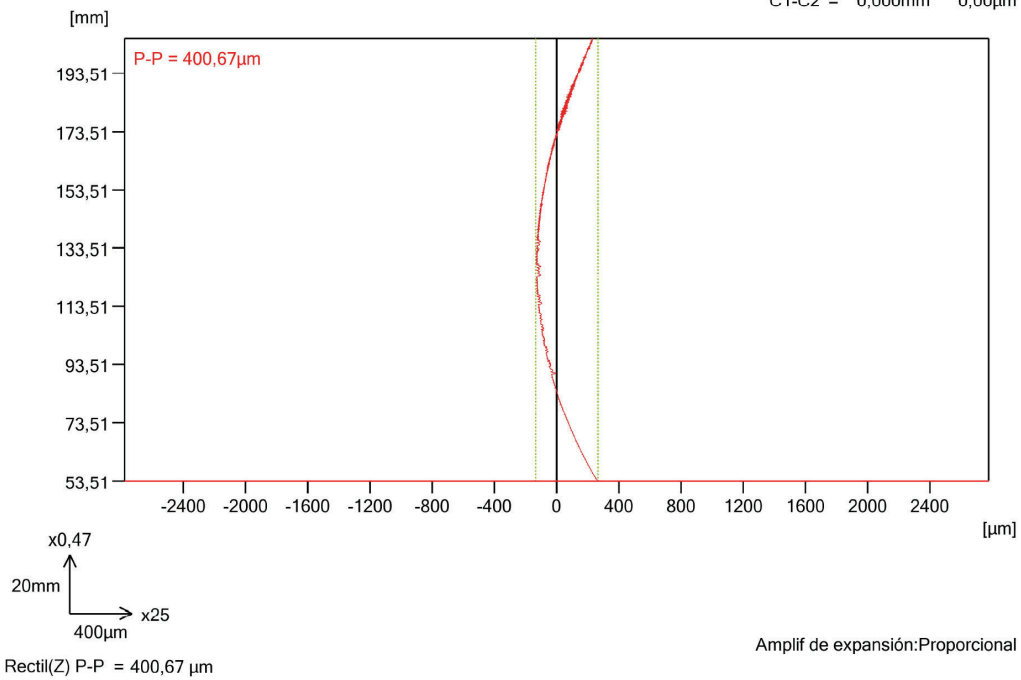


Ilustración 72. Gráfica resultado del perfilómetro de la primera probeta con 100 % de relleno.

# Anexos

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

C1 = 54,320mm 333,70µm  
 C2 = 54,320mm 333,70µm  
 C1-C2 = 0,000mm 0,00µm

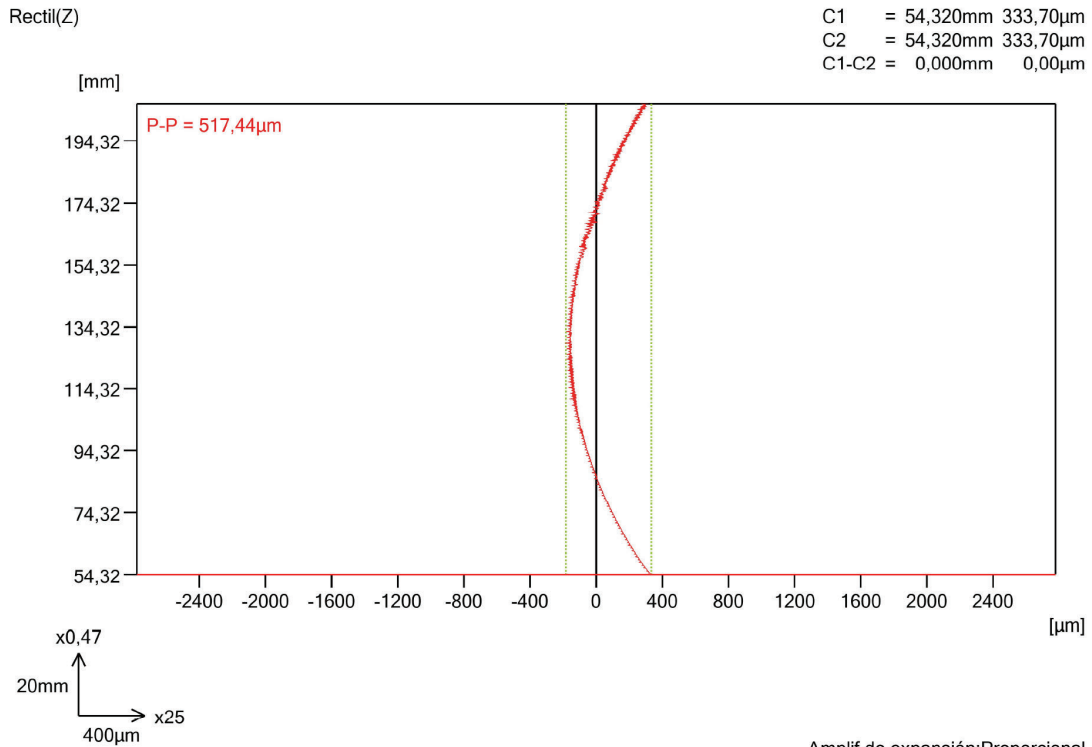


Ilustración 73. Gráfica resultado del perfilómetro de la segunda probeta con 100 % de relleno

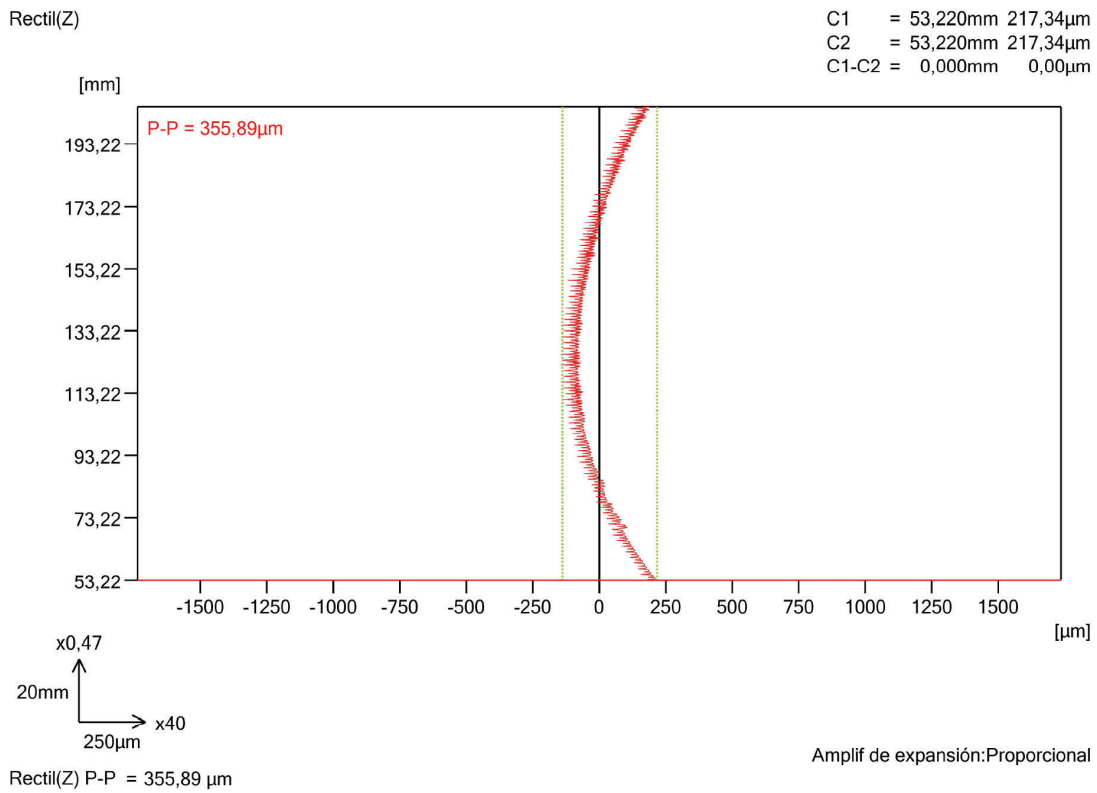


Ilustración 74. Gráfica resultado del perfilómetro de la tercera probeta con 100 % de relleno



### 3. Manual aplicado: Digimat

El presente manual tiene por objetivo explicar los parámetros seleccionados para realizar las simulaciones del trabajo.

Se realizará un recorrido por los paneles principales incidiendo en aquellas funciones que se han modificado de las que el software preselecciona por defecto.

En la Ilustración 75 se muestra en primer menú de control para la simulación. En él se puede seleccionar:

- El directorio principal del proyecto “Project directory”
- El tipo de fabricación aditiva a simular, en este caso FFF (fabricación por filamentos fundidos)
- La impresora en que se trabajará
- El tipo de análisis, en este proyecto se selecciona una alta fidelidad

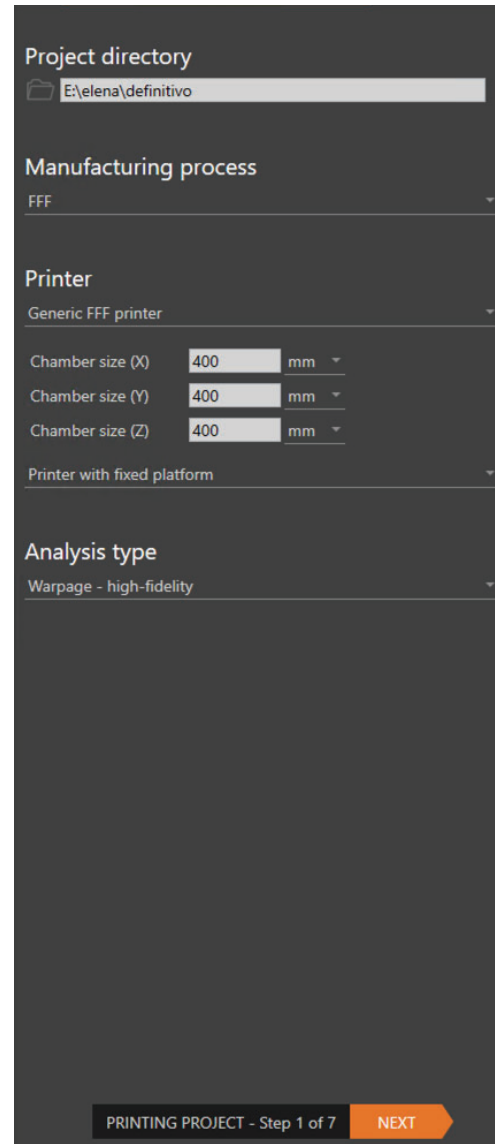


Ilustración 75. Priting project. Digimat

A continuación, en la Ilustración 76 se muestra el menú “Component”. En él se selecciona lo referente a la geometría de la pieza “Part” donde se carga el archivo .stl de la pieza en cuestión.

Respecto al material, se ha escogido un ABS genérico para FFF de la librería de Digimat sin incluir efectos de relajación (viscoelasticidad) por insuficiencia de datos acerca de la curva viscoelástica del material real con el que se desea comparar.

**Part**  
160x30x6  
Bounding box: X:160 Y:30 Z:6  
Units: mm

**Part material**  
Define material

Material name:  
HxGN\_GENERIC\_FFF\_ABS

Type:  
Unfilled  
Amorphous

Matrix:  
ABS Import data

CTE Symmetry: Isotropic

Include relaxation effect

**Support material**  
None

**Export**  
Export geometry

PREVIOUS COMPONENT - Step 2 of 7 NEXT

Ilustración 76. Component. Digimat

En el siguiente paso encontramos el menú de la Ilustración 77 sobre cuestiones acerca de la fabricación del modelo. En este apartado se introduce el archivo .gcode, generado en este proyecto con el software Simplify, que marca el recorrido del extrusor para la fabricación correcta de la pieza.

Además, se deben completar adecuándose a las condiciones propias de fabricación los parámetros sobre temperatura de fabricación, tiempo de enfriamiento y temperatura final entre otros

The screenshot displays the 'Printer' settings for a 'Generic FFF printer'. The 'Manufacturing steps' section is expanded to show 'Warpage compensation' with options for 'Apply uniform scaling' and 'Load modified geometry'. The 'Positioning' section is also visible. The 'Toolpath' section shows a folder named '100-45' and a checkbox for 'Use custom thickness for the first layer', with a 'Geometry synchronization' button below. The 'Process parameters' section is expanded to show various settings:

Parameter	Value	Unit
Chamber temperature type	Constant	
Chamber temperature	100	°C
Extrusion temperature	240	°C
Use heated build plate	<input checked="" type="checkbox"/>	
Build plate temperature	100	°C
Bead width	0.5	mm
Convection coefficient	0.015	mW/(mm <sup>2</sup> .°C)
Cooling time	30	s
Final temperature	23	°C
Room temperature	23	°C

At the bottom, there are navigation buttons: 'PREVIOUS', 'MANUFACTURING - Step 3 of 7', and 'NEXT'.

Ilustración 77. Manufacturing. Digimat.

Por último, en el apartado de solución, se define:

- La discretización de los elementos. En este caso, para mayor exactitud se ha escogido capa a capa “layer by layer”.
- En el apartado “Meshing” se selecciona el tamaño de los objetos de malla, es común usar el doble que la altura de capa. Tras realizar el mallado clicando en “Mesh part” se puede comprobar el número de elementos o “voxels”.
- En el modelo de material se puede definir con mayor precisión el material a simular. En este caso se ha indicado el coeficiente de dilatación térmica calculado experimentalmente en el apartado 0, se muestra esta ventana en la

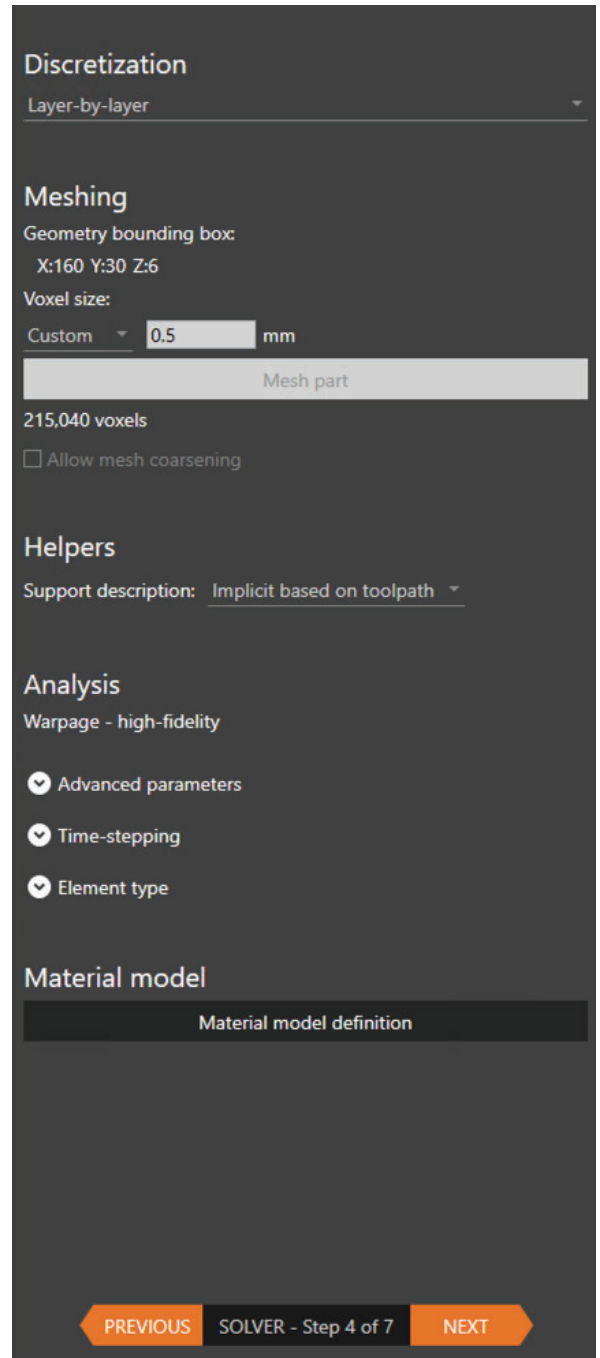
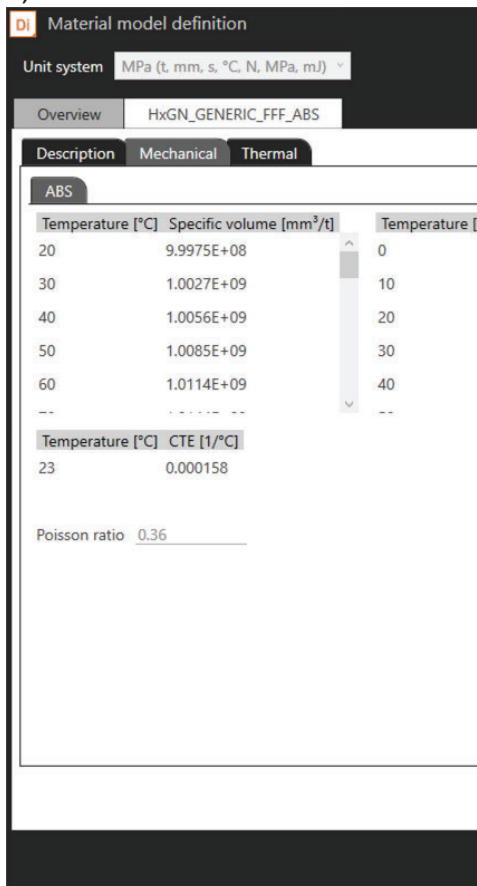


Ilustración 78. Solver. Digimat (derecha)

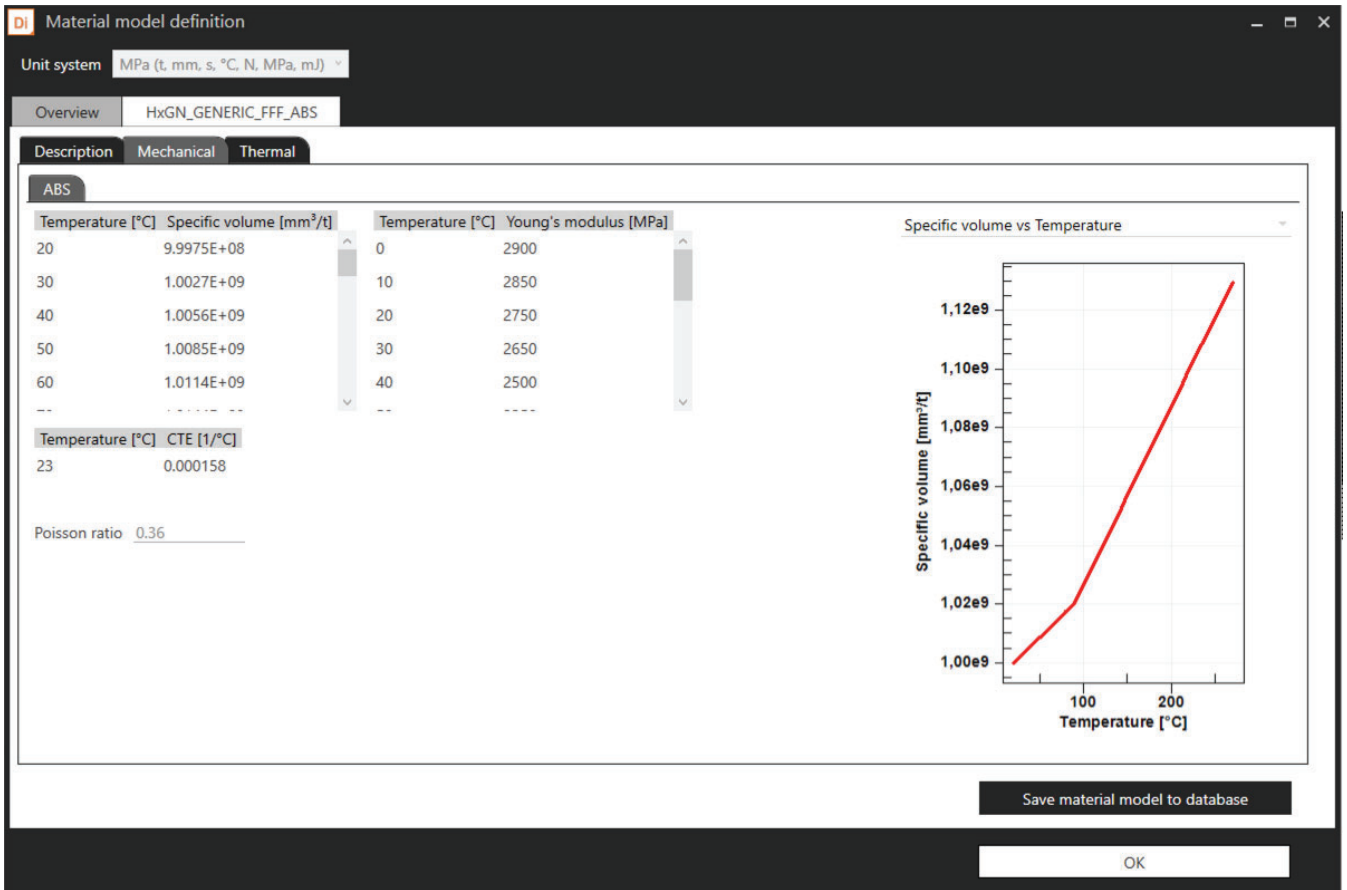


Ilustración 79. Material model definition. Digimat

Finalmente, antes de comenzar el proceso de cálculo, Digimat muestra el menú “Job submission”, Ilustración 80 con un pequeño resumen del proyecto, la opción de paralelizar el cálculo en varios ordenadores y el nivel de precisión que se desea obtener en los resultados de temperatura, desplazamiento y tensiones residuales.

En estos niveles de precisión se han seleccionado los máximos (End of all layer) para la temperatura y el desplazamiento, principales variables del estudio presente y se ha dispuesto al mínimo las tensiones residuales para reducir el coste computacional del cálculo.

**Project review**

Printer	Generic FFF printer
Part	160x30x6
Units	MPa (t, mm, s, °C, N, MPa, mJ)
Part material	HxGN_GENERIC_FFF_ABS
Analysis	Warpage - high-fidelity
Mesh	215,040 voxels
Project directory	E:\elena\definitivo

**Submission type**

Local  Remote

**Parallelization**

Use domain decomposition

Job generation:  CPUs / 8

Warpage:  CPUs / 8

**Output control**

History output

Temperature	End of all layers ▾
Displacement	End of all layers ▾
Residual stresses	Minimum ▾

Computation in progress...

PREVIOUS JOB SUBMISSION - Step 5 of 7 NEXT

Ilustración 80. Job submission. Digimat

Para más información consultar el manual oficial de Digimat, [22]



#### 4. Manual aplicado: Simplify

Este manual tiene por objetivo definir los principales parámetros de impresión y como modificarlos con Simplify, además de proporcionar una idea general de uso que permita, en investigaciones posteriores, acceder de manera sencilla y efectiva a todas las funcionalidades del programa.

Por otro lado, excepto los parámetros comentados en el epígrafe 27, todos los valores mostrados en las siguientes imágenes son los recomendados por el fabricante de la impresora JCR 600.

En primer lugar, se muestra en la Ilustración 81. Captura de Simplify 3D. Interfaz de inicio la pantalla general de opciones del programa.

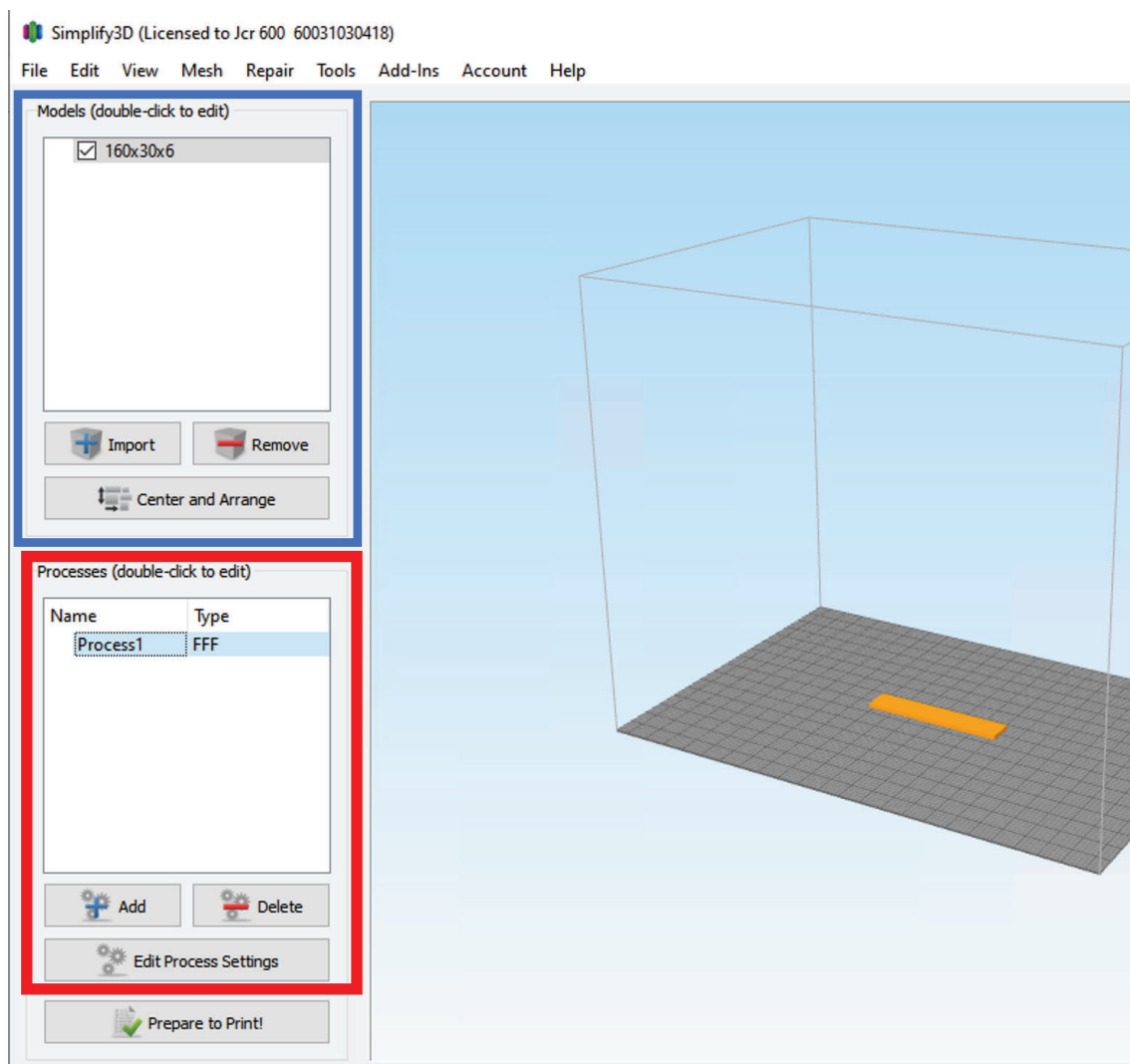


Ilustración 81. Captura de Simplify 3D. Interfaz de inicio

En recuadro azul se introducen las piezas modelas en CAD como archivos .stl, se pueden agregar más de una para realizar impresiones de varias piezas simultáneamente,

además con el icono de “Center and Arrange” se posicionan las piezas donde más convenga en la fabricación (usualmente en el centro de la cama).

En el recuadro rojo se añaden los parámetros de fabricación. Haciendo clic en “Add” se crea una nueva configuración y en “Edit Process Setting” se modifica el seleccionado. Al hacer clic en “Prepare to Print” muestra la Ilustración 93. Captura de Simplify 3D. Interfaz final de impresión que se comentará al final de este manual.

Además, en la parte superior se encuentran, como en la mayoría de los programas, las opciones para guardar el archivo y demás opciones.

Es interesante puntualizar las diferentes opciones para los distintos tipos de archivos. En la opción de File, tal como se muestra en Ilustración 82. Captura de Simplify 3D. Cabecera del programa, File desplegado, se encuentran comandos para tratar los archivos. La extensión .factory (Factory Files) es el tipo de archivo más completo que procesa el software. Este tipo de archivo incluye la geometría de la pieza (archivo “Models” con extensión .stl) y los parámetros de impresión definidos (archivo FFF profile con extensión .FFF). Sin embargo, una impresora 3D no es capaz de procesarlo, por lo que es necesario pasar el archivo .factory a .gcode en la opción “Prepare to Print!”.

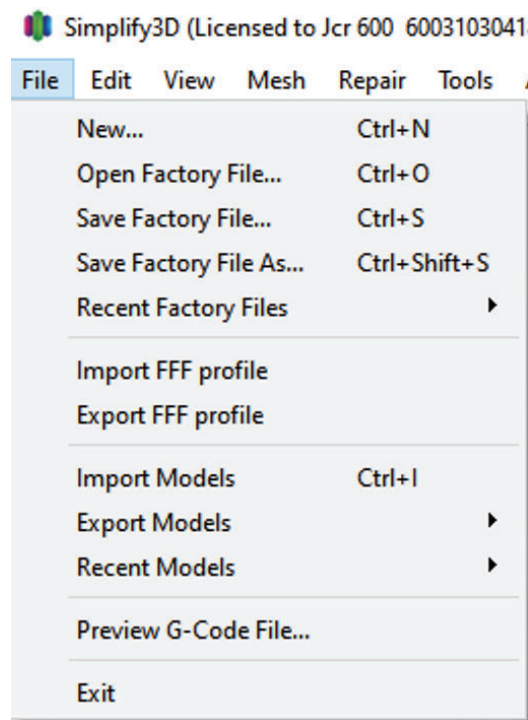


Ilustración 82. Captura de Simplify 3D. Cabecera del programa, File desplegado

Al clicar en añadir o modificar en los parámetros de impresión se observa la siguiente página mostrada en la Ilustración 83. En la cabecera de esta página se puede seleccionar el archivo de partida de los parámetros de impresión .FFF, por si hay algún archivo anterior valido en que tan solo se quiere modificar algunos parámetros. Se puede cargar el antiguo (update), guardar el actualizado (save as new) o borrar todos los parámetros y empezar por los definidos por defecto en el programa (remove).

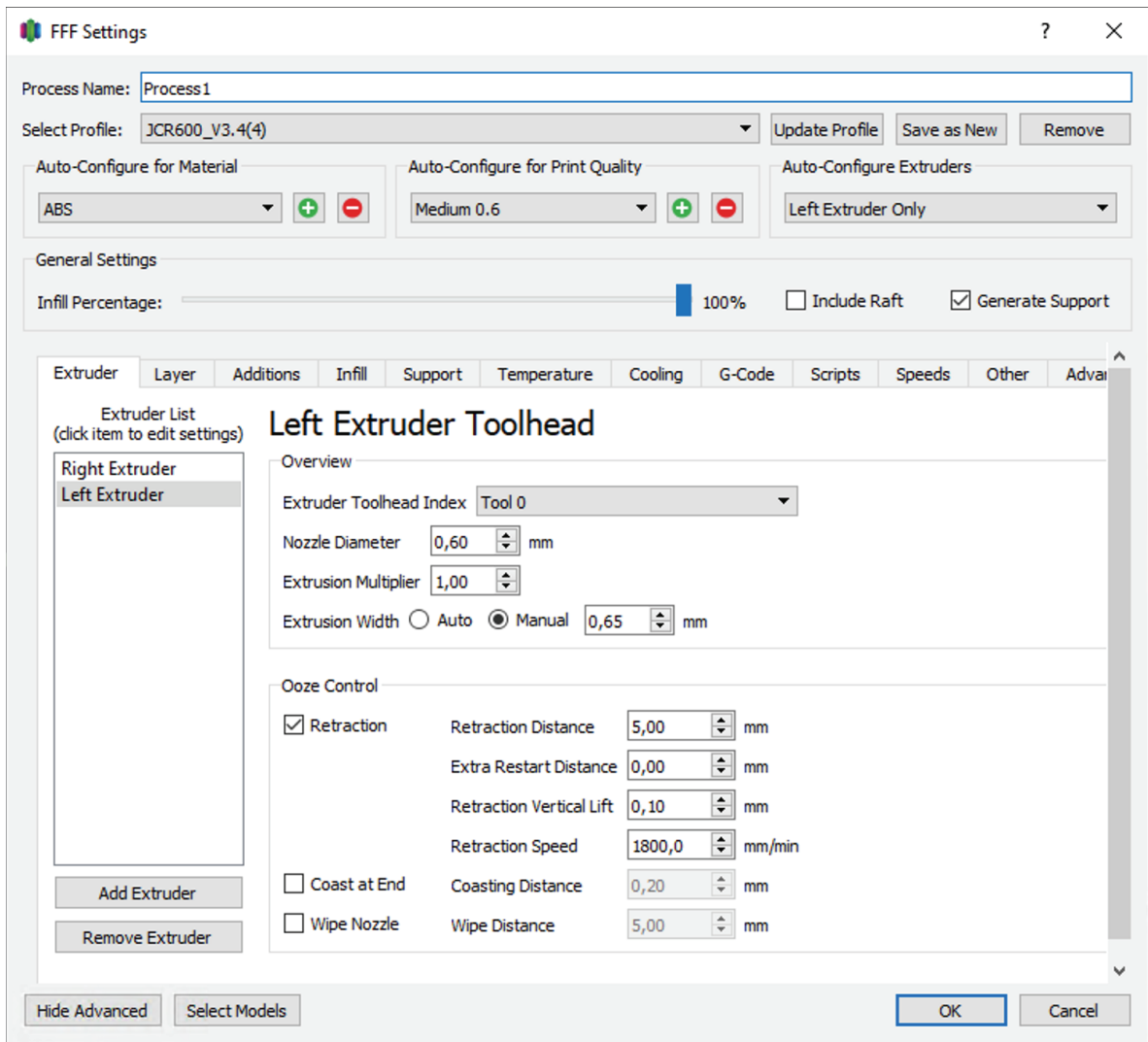


Ilustración 83. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Extruder"

Además en la cabecera se encuentran parámetros de rápido ajuste para el material, la calidad de impresión (normalmente acorde al diámetro de la boquilla del extrusor), en caso de varios extrusores, elegir el que se está configurando, el porcentaje de relleno deseado y la opción de generar soporte y/o raft Ilustración 84, Ilustración 85 e Ilustración 86.



Ilustración 84. Soporte faldita [23]

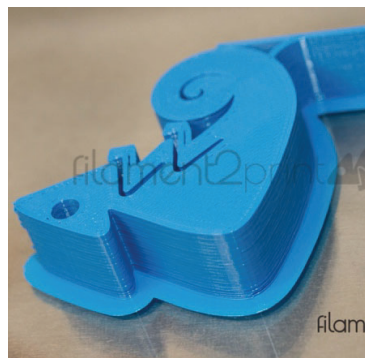


Ilustración 85. Soporte Brim [23]

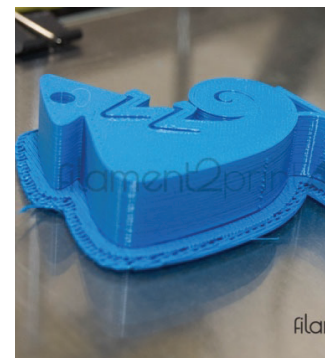


Ilustración 86. Pieza con Raft, más adecuado para materiales de difícil adhesión [23]

En la parte central inferior se encuentran diferentes pestañas para un ajuste más avanzado de cada uno de los parámetros.

En la pestaña de extrude en la parte izquierda se escoge el extrusor que se está utilizando (izquierdo o derecho en función de sobre el cuál se ha instalado la bobina del material) y en la parte central se configura el diámetro del cabezal (Nozzle Diamtre) función de la boquilla instalada en la impresora y el ancho de extrusión (Extrusion Width) aconsejablemente 0,05 mm superior al diámetro del extrusor.

El resto de los parámetros se mantienen por defecto.

En la pestaña de capa (Layer), Ilustración 87.

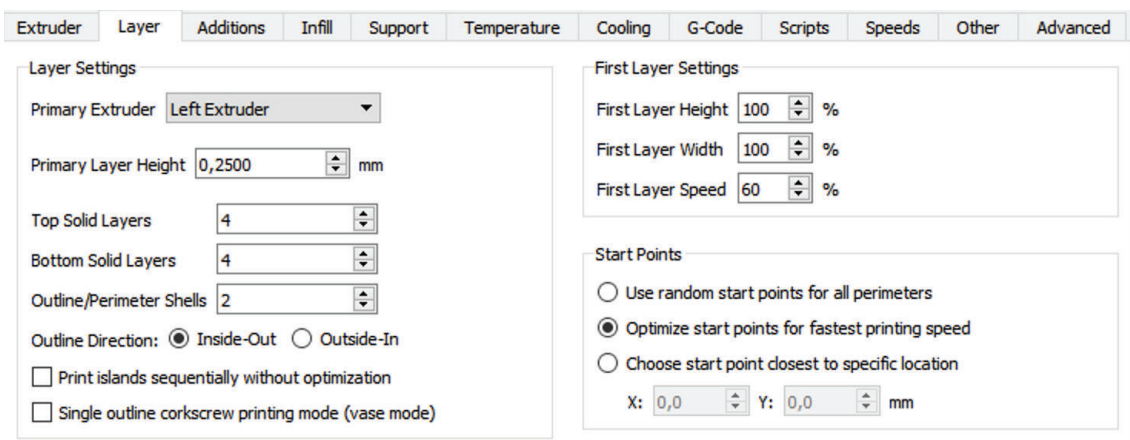


Ilustración 87. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Layer"

En la parte izquierda, se vuelve a seleccionar el extrusor sobre el que se está trabajando (si se ha definido en los parámetros rápidos iniciales no es necesario manipularlo). Primary Layer Height se refiere al espesor de capa deseado y las tres funciones posteriores hacen referencia al número de capas superficiales a imprimir en la parte superior (Top), inferior (Botton) y el número de líneas perimetrales antes de empezar el relleno (outline Shells) y su dirección (inside / outside).

Además , en la parte derecha superior se pueden escoger los parámetros de espesor de ancho y largo, además de la velocidad de la primera capa.

Y en la parte inferior derecha se define el punto de inicio de la impresión.

Para el relleno (Infill), Ilustración 88, en la parte izquierda se modifican los parámetros generales como porcentaje de relleno y tipo y en la parte izquierda los ángulos de aplicación de los rellenos escogidos, tanto del relleno interno como del externo (referidos a las capas superior e inferior).

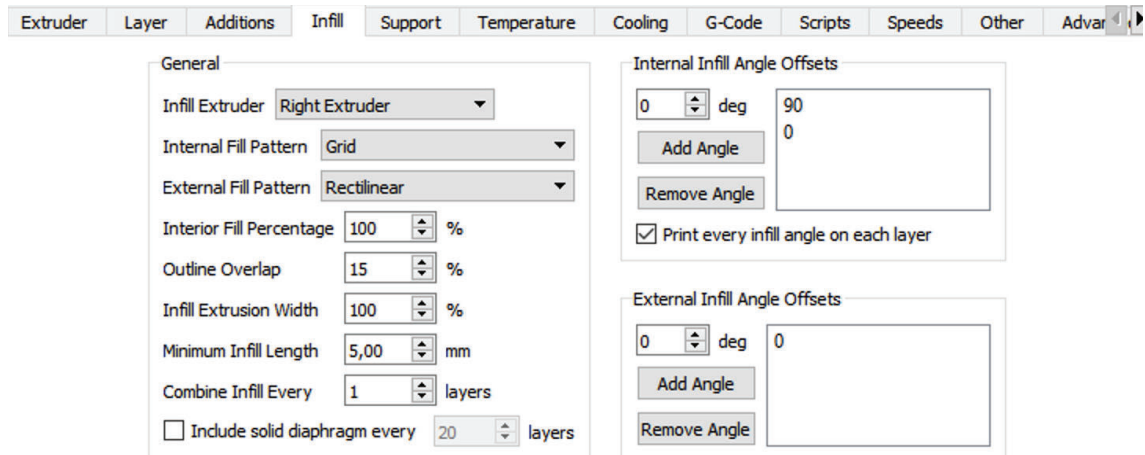


Ilustración 88. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Infill"

Además, en el recuadro derecho se define el solape entre el relleno y las líneas del perímetro (Outline Overlap). En las probetas de estudio este parámetro se subió al 20% para evitar huecos en la simulación por elementos en DigiMat.

En Ilustración 89 se muestran los tipos de relleno que ofrece el software y su correspondencia en la impresión Ilustración 90.

## Anexos

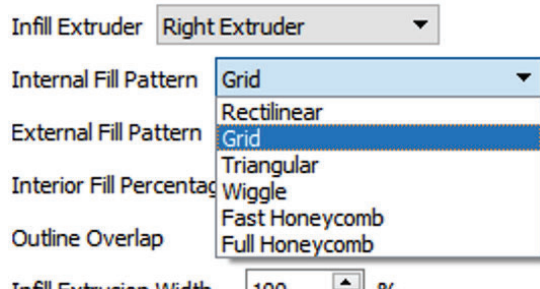


Ilustración 89. Captura de Simplify 3D. Tipos de patrones de relleno

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

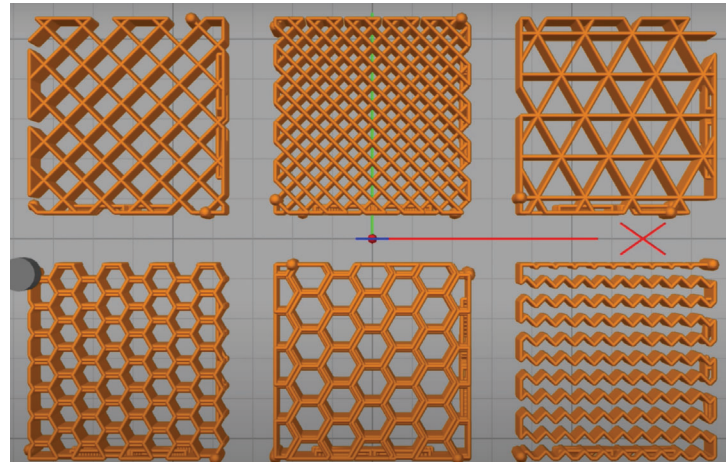


Ilustración 90. Tipos de relleno, de izq. a derc. y de arriba a abajo: Rectilinear, Grid, Triangular, Fast Honeycomb, Full Honeycomb y Wiggle. [24]

En esta pestaña sobre temperatura que se muestra en la Ilustración 91 se selecciona en el panel izquierdo el elemento a definir y en la parte derecha se escribe la temperatura deseada para dicho elemento.

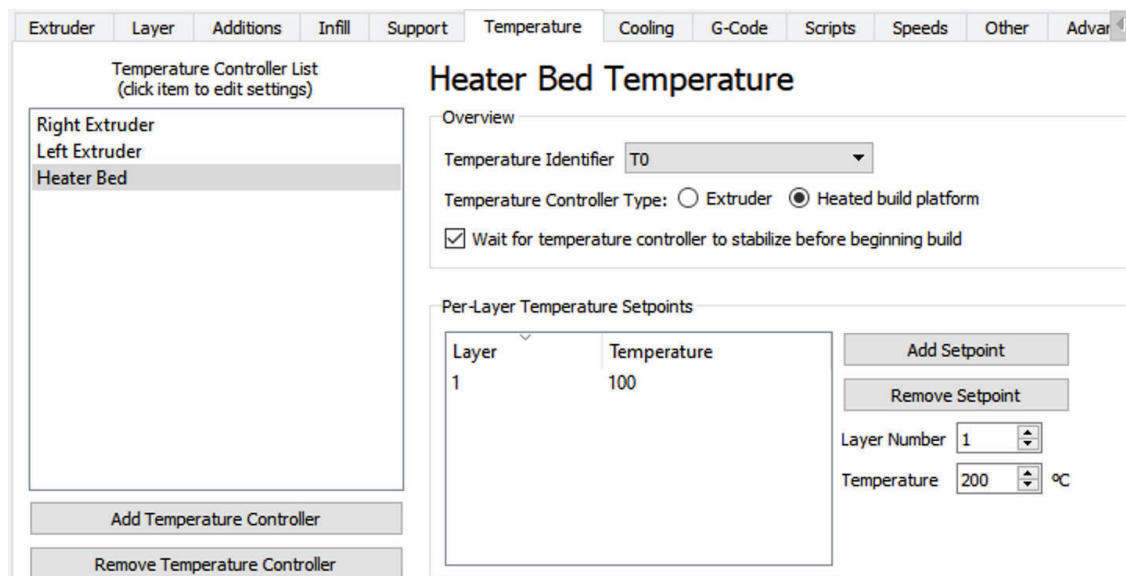


Ilustración 91. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Temperature"

Por último, la velocidad (Speed) Ilustración 92.

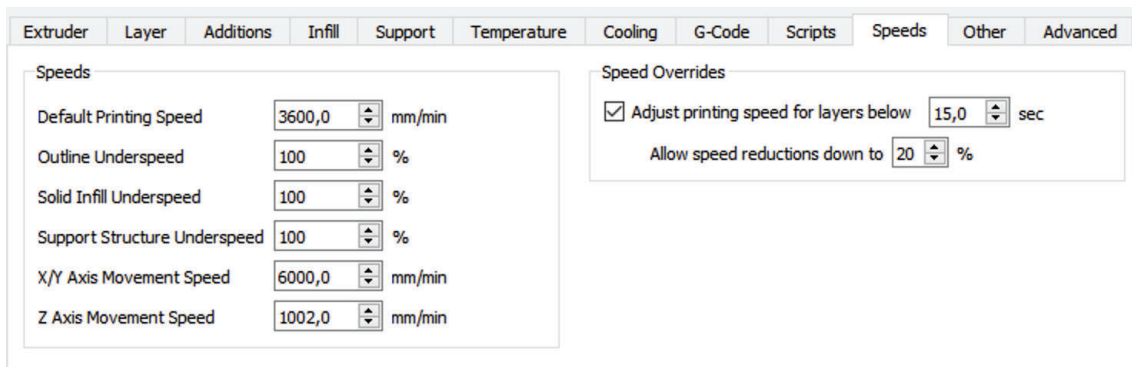


Ilustración 92. Captura de Simplify 3D. Parámetros de impresión "Speed"

En el panel izquierdo el primer parámetro hace referencia a la velocidad general de impresión. Los parámetros a continuación permiten modificar en porcentaje la velocidad concreta de impresión de ciertos elementos de la pieza a imprimir como el perímetro (outline), el interior (solid infill) o el soporte (support). Los últimos dos valores de este panel indican la velocidad de movimiento del cabezal (X/Y) y la cama (Z normalmente es la cama, aunque dependiendo de la impresora podría ser el cabezal) cuando no está imprimiendo sino en la etapa anterior, posicionándose para extruir.

La velocidad de impresión está directamente relacionada con la calidad, en general, a menor velocidad mayor calidad de la pieza resultante.

Para finalizar se observa la Ilustración 93, al que se accede desde el panel general con "Prepare to Print!" o al abrir un archivo .gcode.

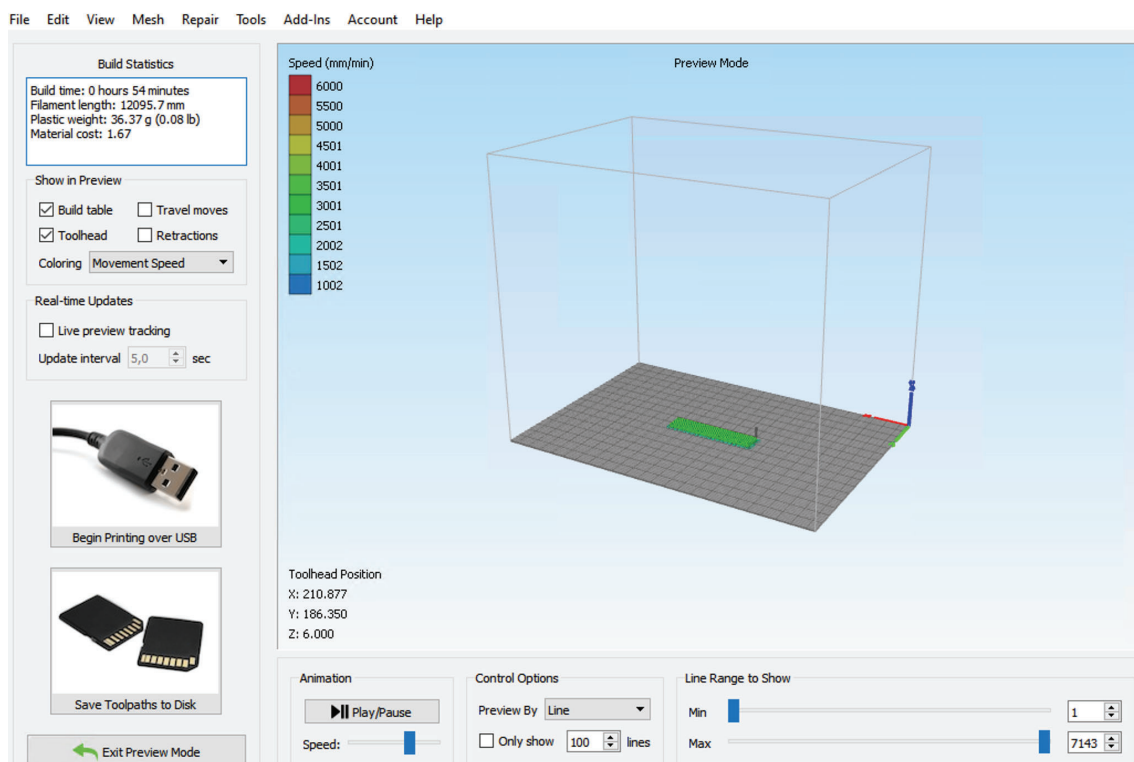


Ilustración 93. Captura de Simplify 3D. Interfaz final de impresión

En la parte derecha se puede observar una simulación de la impresión configurable en la parte inferior por capas o línea a línea (Controls option), también se puede variar la velocidad de visualización (Animation> Speed).

En la parte derecha se observa información aproximada interesante (Build Statics) como el tiempo de impresión, la longitud del filamento gastado o el peso total de la pieza. Por último, se puede guardar el archivo .gcode en un dispositivo de almacenamiento portátil conectado al puerto USB del equipo informático o en disco local del computador.

Para más información consultar el manual oficial de Simplify 3D [25]



## 5. Manual aplicado: FLIR ResearchIR Max orientado a impresión 3D

Este manual tiene por objetivo definir los principales parámetros de utilizados en la fotometría y como modificarlos con FLIR Research IR Max, además de proporcionar una idea general de uso que permita, en investigaciones posteriores, acceder de manera sencilla y efectiva a todas las funcionalidades del programa.

### 5.1. Inicio

En primer lugar, se muestra en Ilustración 94 la pantalla general de opciones del programa.

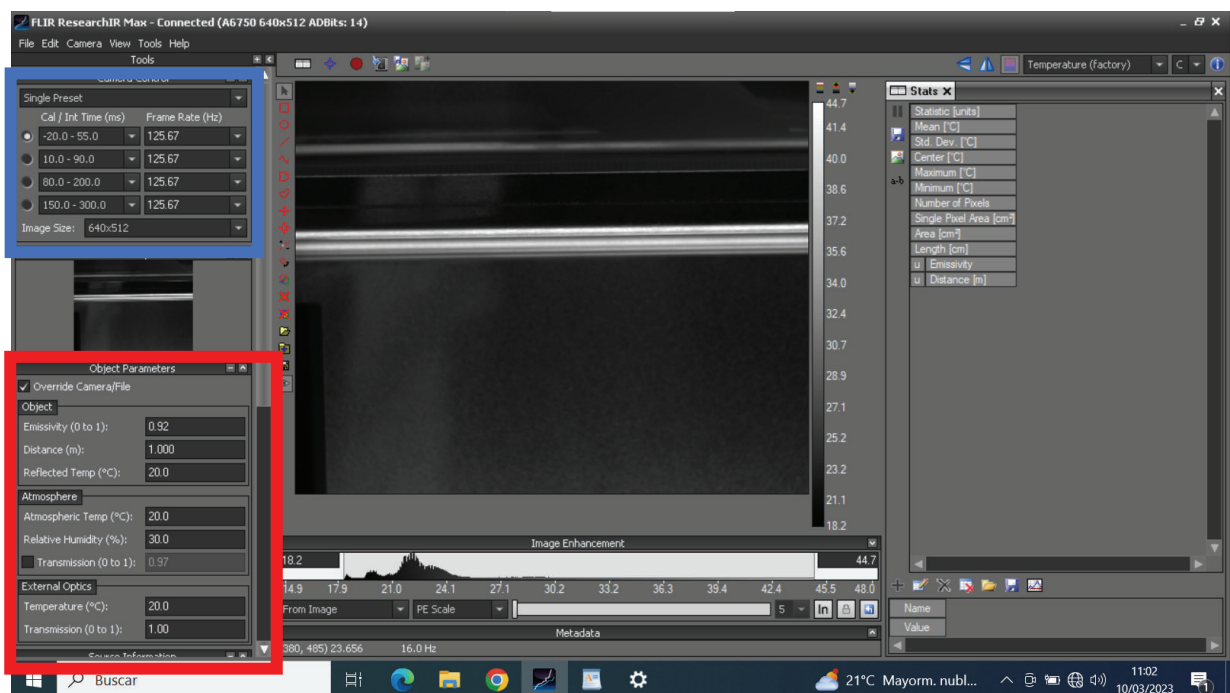


Ilustración 94. Captura de FLIR ResearchIR Max. Interfaz de inicio tras abrir la aplicación

Para conectar la cámara al ordenador, una vez encendida esta y conecta por USB al ordenador, se debe seguir la ruta Camera>Connect de la barra superior, tal y como se muestra en Ilustración 95.



Ilustración 95. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú para conectar la cámara

## 5.2. Ajustes iniciales

En el lateral izquierdo de la pantalla de inicio se muestran las herramientas, la Ilustración 96 es una ampliación detallada de este menú.

Las utilidades principales de estas herramientas se encuentran en “Cámara Control”. El usuario puede escoger qué intervalos de  $T^a$  ( de -20 a 50°C; de 10 a 90°C; ...) quiere medir, si se van a medir varios intervalos (Superframing) o uno solo (Single Preset).

Otras opciones interesantes son la frecuencia de captura de imágenes (Superframe Rate) o el tamaño de las mismas (Imagen Size).

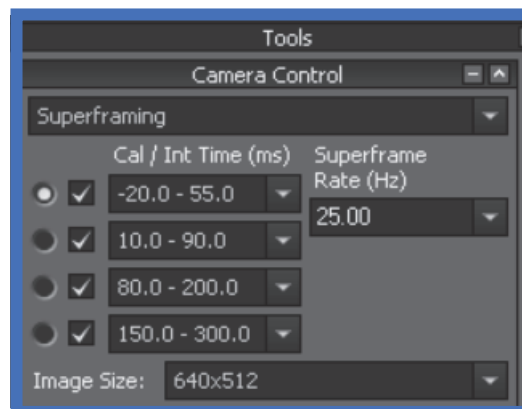


Ilustración 96. Captura de FLIR ResearchIR Max. Herramientas de visualización

Otro menú inicial a destacar se muestra en Ilustración 97. Para cambiar los parámetros generales, en el lateral izquierdo en el menú “Object Parameters” se pueden modificar los datos del objeto de estudio, de la atmosfera o externos de la toma de datos.

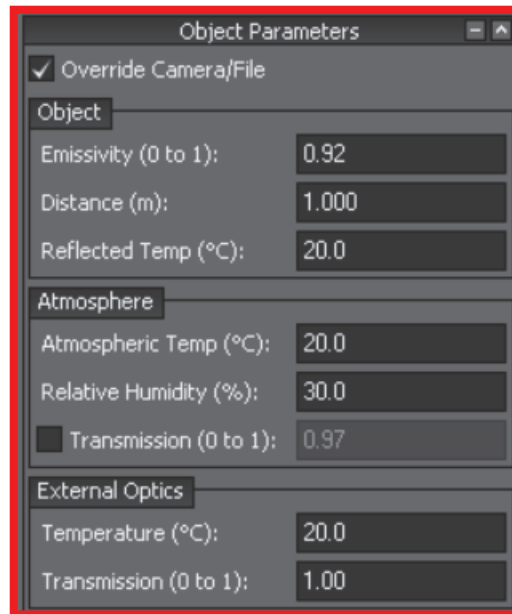


Ilustración 97. Captura de FLIR ResearchIR Max. Parámetros para el cálculo de los objetos de estudio

### 5.3. Previsualización

Para las opciones de previsualización de la cámara en tiempo real se accede tal y como se muestra en la Ilustración 98. Las opciones que ofrece son la ampliación, reducción o ajuste de la imagen central de previsualización. Se accede desde la barra superior View>zoom.

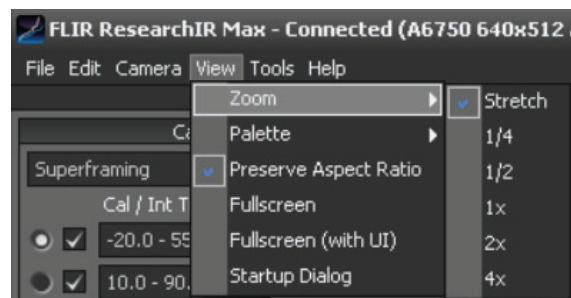


Ilustración 98. Captura de FLIR ResearchIR Max. Opciones de la previsualización

Por otro lado, para escoger el intervalo de  $T^a$  mostrado en la visualización, se accede tal y como se muestra en la Ilustración 99 en el recuadro marcado de amarillo. El usuario puede escoger entre el 0 -> (-20 – 55°C), 1 -> (10 – 90 °C), 2 -> (80 – 200 °C), etc... , en el icono “A” se hará un barrido por todas las capturas secuencialmente y en el icono “5F” se superponen las capturas, mostrando todos los intervalos simultáneamente.

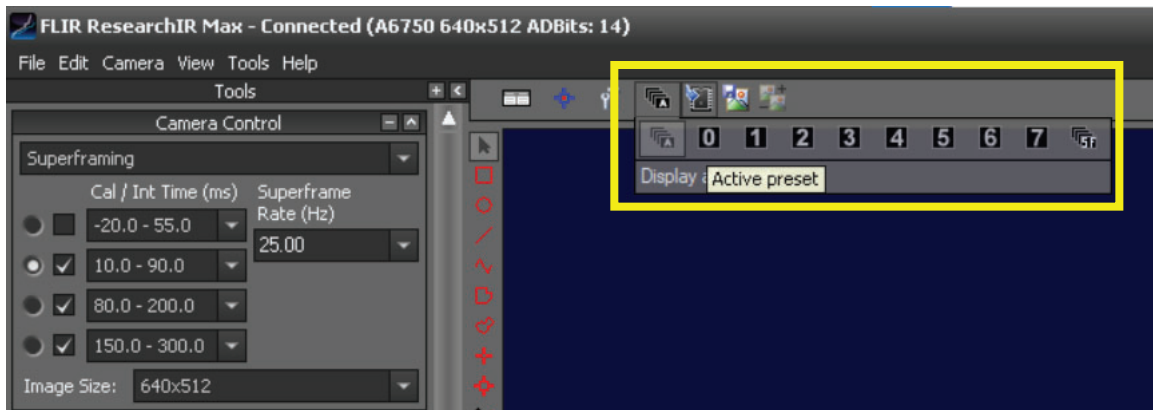


Ilustración 99. Captura de FLIR ResearchIR Max. Elección de la termografía a visualizar

#### 5.4. Captura de datos

Una vez realizado los ajustes iniciales y de visualización se procede a grabar o capturar imágenes del estudio. Para ello se accede siguiendo la ruta mostrada en la Ilustración 100, marcado de amarillo la zona de interés.

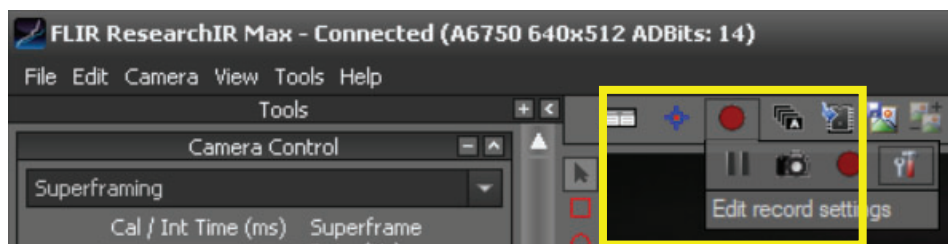


Ilustración 100. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ruta de acceso a las herramientas de grabación

Se resaltan los ajustes de grabación Ilustración 101 (acceso desde el menú mostrado en la Ilustración 100). En "Record Mode" (amarillo) se puede ajustar grabar un número determinado de capturas (record this many frames), por un periodo de tiempo concreto (Record for this duration), teniendo en cuenta que se pausará antes si el número de capturas máxima se alcanza.

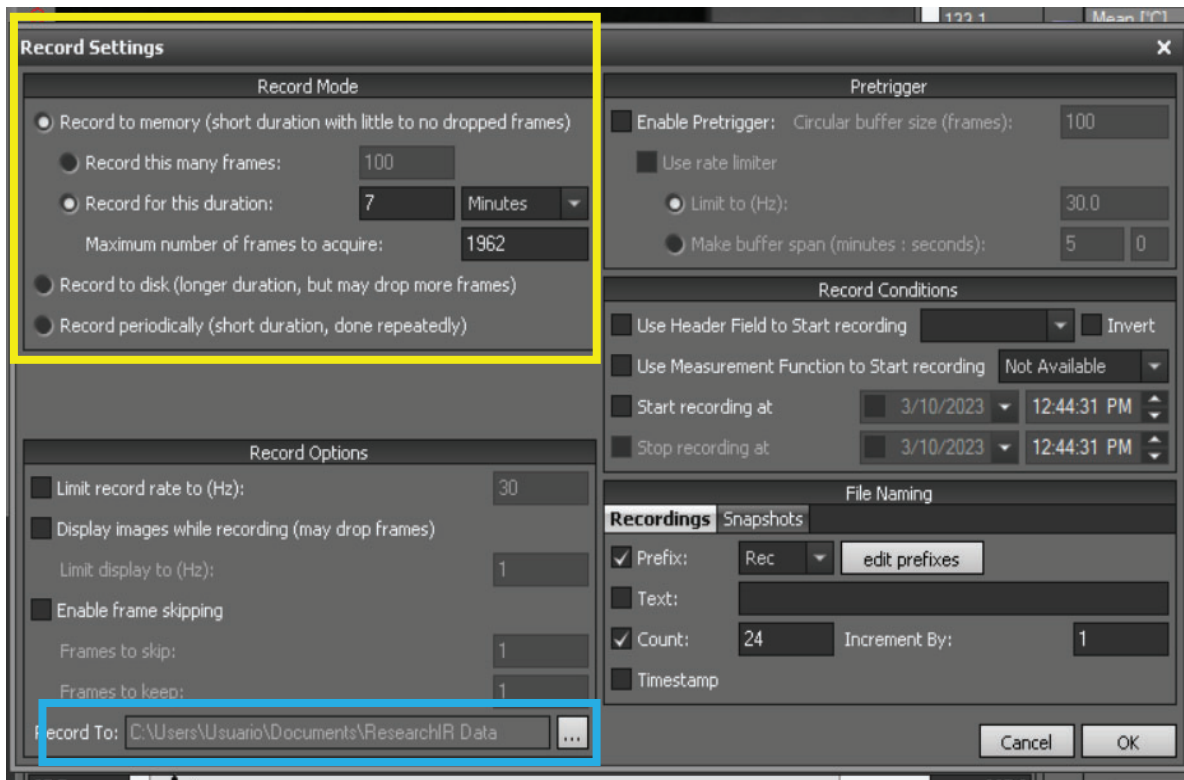


Ilustración 101. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ajuste de grabación

El dispositivo realizará las capturas con mayor o menor frecuencia (variando de esta forma las dimensiones del archivo grabado) dependiendo del “Superframe Rate” que hayamos marcado en los ajustes de “Cámara Control” para la visualización. El modo usado en el estudio es la grabación periódica (Record periodically) que se explicara más adelante.

Abajo a la izquierda de este mismo menú podemos ver el directorio dónde se guardarán los archivos (azul).

Seleccionando “record periodically” tal como se muestra en Ilustración 102, se lleva a cabo la captura de un número determinado de fotogramas (Record this many frames) en intervalos preestablecidos (Record period). Se recomienda seleccionar el mismo número de intervalos de fotogramas que se hayan establecido en los controles de la cámara (mostrado en la Ilustración 96), de manera que se capturen simultáneamente todos los fotogramas seleccionados. En caso de que el número de fotogramas seleccionados exceda los ajustes de grabación, se tomarán las capturas de los primeros fotogramas en la primera captura y, después del tiempo establecido, los siguientes fotogramas de manera sucesiva.

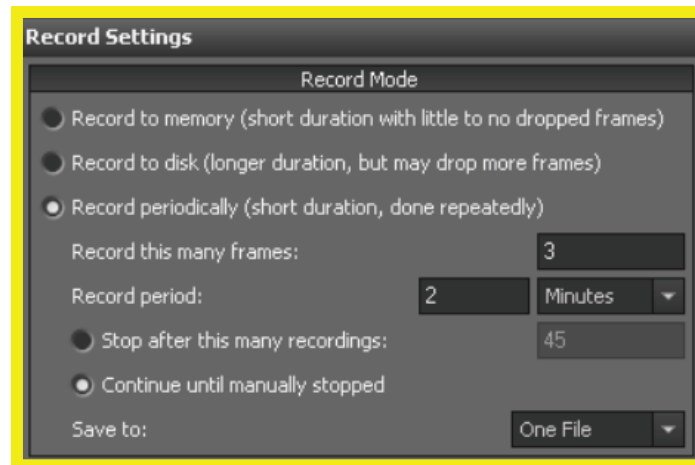


Ilustración 102. Captura de FLIR ResearchIR Max. Ajuste de grabación periódicos

Es posible elegir el modo de finalización de la grabación, ya sea después de un número de frames determinado o de forma manual. Además, se puede optar por guardar las capturas en un único documento (modo utilizado en el proyecto) o en archivos independientes para cada una de las capturas.

Tanto en la previsualización como en los archivos guardados tenemos distintas formas de visualizar los resultados. Se escogen siguiendo la ruta marcada de amarillo en la Ilustración 103.

El modo Stats, ruta de acceso ampliada en la Ilustración 104, permite al usuario seleccionar en la zona de la visualización un recuadro, línea o zona de interés (marcadas rojo, Ilustración 105) y cambiar en estas zonas parámetros decisivos como la emisividad (Emissivity) o la distancia lente – objeto (Distnace).

En la parte derecha (marcado en azul ampliado en la Ilustración 106) se observan los resultados de la zona de interés seleccionada con las herramientas anteriores.

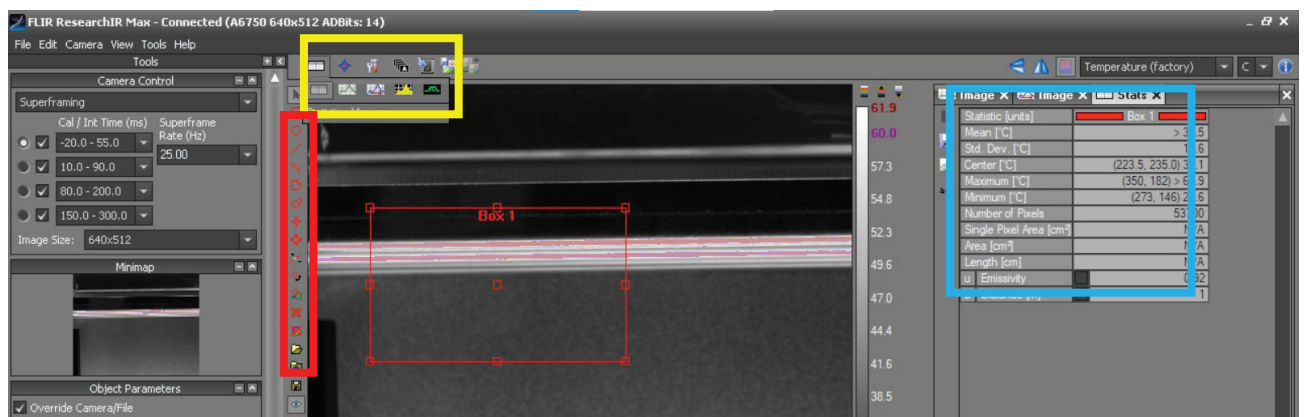


Ilustración 103. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, visión general

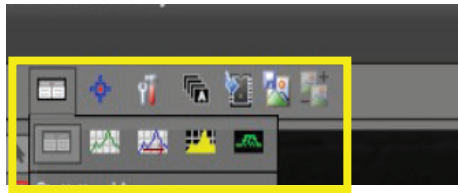


Ilustración 104. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, opciones de visualización de los resultados.



Ilustración 105. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, herramienta de selección de elementos en la imagen.

Statistic [units]	Box 1
Mean [°C]	> 33.5
Std. Dev. [°C]	10.6
Center [°C]	(223.5, 235.0) 30.1
Maximum [°C]	(350, 182) > 61.9
Minimum [°C]	(273, 146) 20.6
Number of Pixels	53700
Single Pixel Area [cm <sup>2</sup> ]	N/A
Area [cm <sup>2</sup> ]	N/A
Length [cm]	N/A
u Emissivity	0.92
u Distance [m]	1

Ilustración 106. Captura de FLIR ResearchIR Max. Tratado de imágenes y datos, tabla de datos

## 5.5. Proceso de recopilación de información a partir de las grabaciones realizadas

En la Ilustración 107 se muestra las distintas funciones de visualización y recopilación de la información.

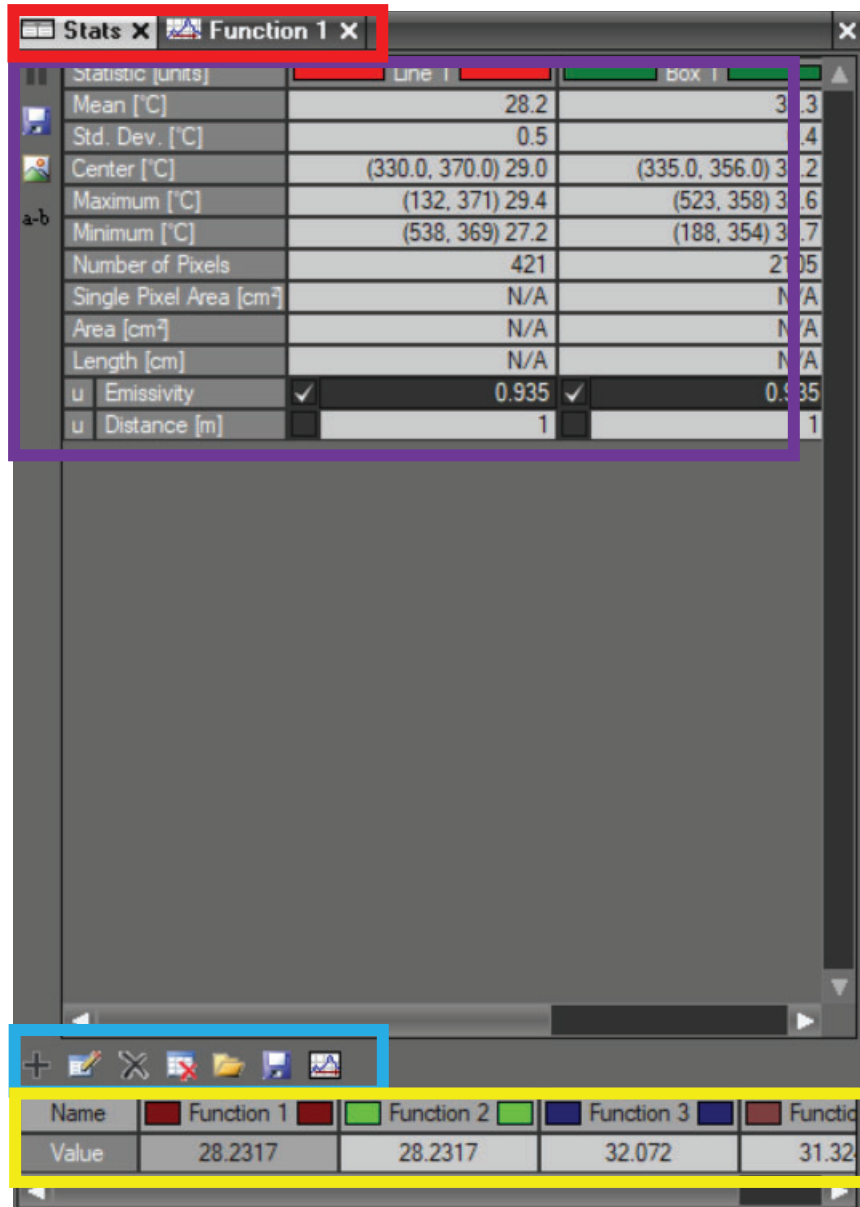


Ilustración 107. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú de datos

El método seguido para trazar las gráficas del estudio termográfico es el siguiente:

- Selección de los objetos de interés en la imagen tal y como se mostró junto a la Ilustración 105 e Ilustración 106. Obteniendo las tablas mostradas en el recuadro morado.
- En el recuadro azul, en el icono “+” se abre una nueva pestaña mostrada en la Ilustración 108 para crear una nueva función. También se puede modificar una existente, eliminarlas todas, eliminar la seleccionada (seleccionarlas en entre las existentes, marcado en amarillo) o abrir y guardar las plantillas creadas.

- En dicha ventana de creación de una nueva función, en la Ilustración 108, se selecciona el objeto del que se desea obtener la información y su parámetro de interés, en este caso la Línea 1 (Line 1) y su temperatura (Mean). Para añadir dicha variable se debe clicar en “Add Variable”. Podemos cambiar el nombre de la función y su color (recuadro verde). Guardamos y finalizamos la tarea al pulsar “OK”.

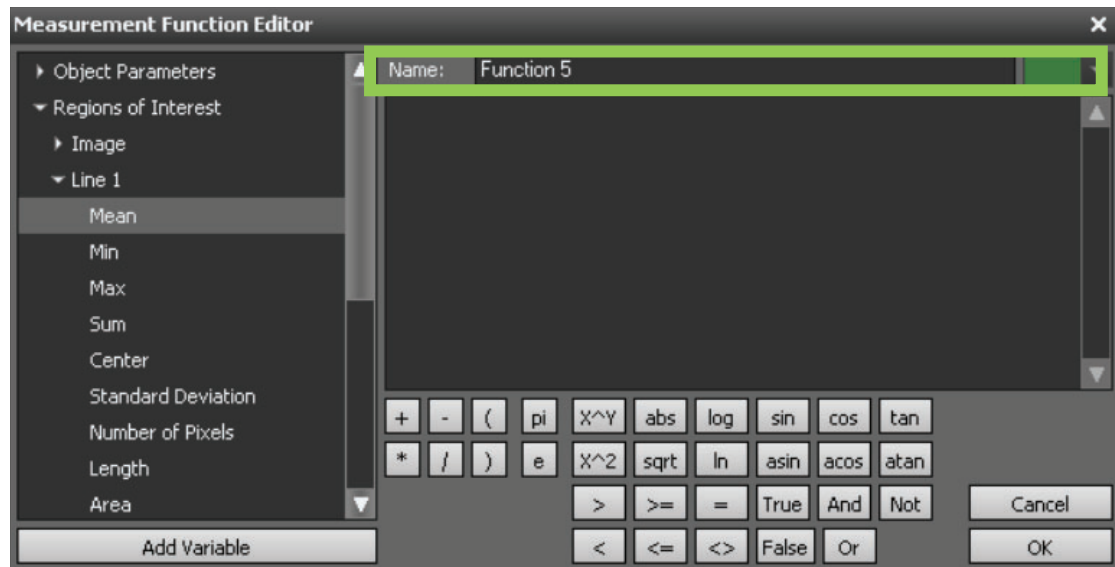


Ilustración 108. Captura de FLIR ResearchIR Max. Selección de variables

- En el recuadro azul de la Ilustración 107 el último icono que refleja una gráfica se utiliza para crear una gráfica en función del tiempo de la función seleccionada (en el recuadro amarillo).
- En el cuadrado rojo en la Ilustración 107 se puede acceder no solo a los datos fijos de los objetos (Stats) sino también a las gráficas anteriormente creadas (Function 1). Clicando en Function 1 se pasa a la siguiente etapa
- En la Ilustración 109 se visualiza el resultado de clicar sobre Function 1. Se observa la variable seleccionada en la Function 1 graficada en función del tiempo.
- Tanto en la Ilustración 109 como en la Ilustración 110 se observa un círculo naranja donde debería de mostrarse al pasar el cursor por esa zona un icono similar a “>>” que realiza la transición entre las pantallas mostradas en l imágenes.
- En la Ilustración 110 se muestran todas las opciones para guardar el gráfico en un archivo .bmp o .csv con los valores de X e Y o cambiar los ajustes de visualización

## Anexos

Correlación numérico-experimental de las dispersiones termomecánicas inducidas durante la fabricación aditiva mediante fusión de filamentos de polímeros

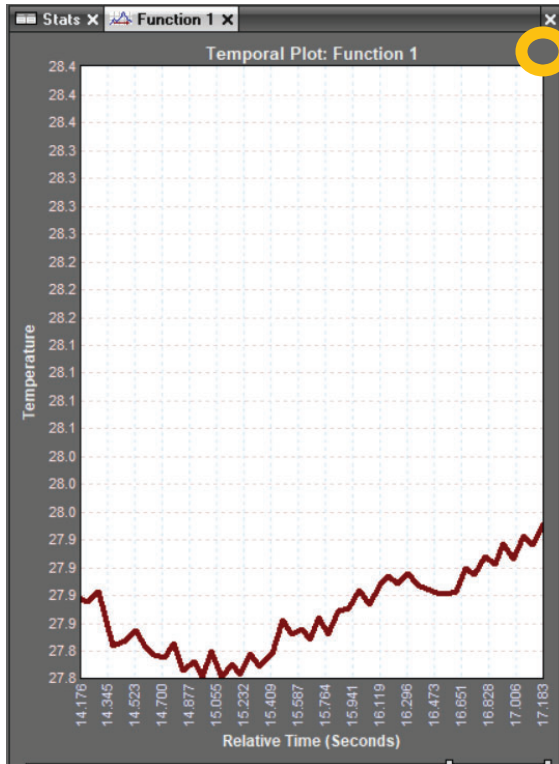


Ilustración 109. Captura de FLIR ResearchIR Max. Gráfica de la función 1

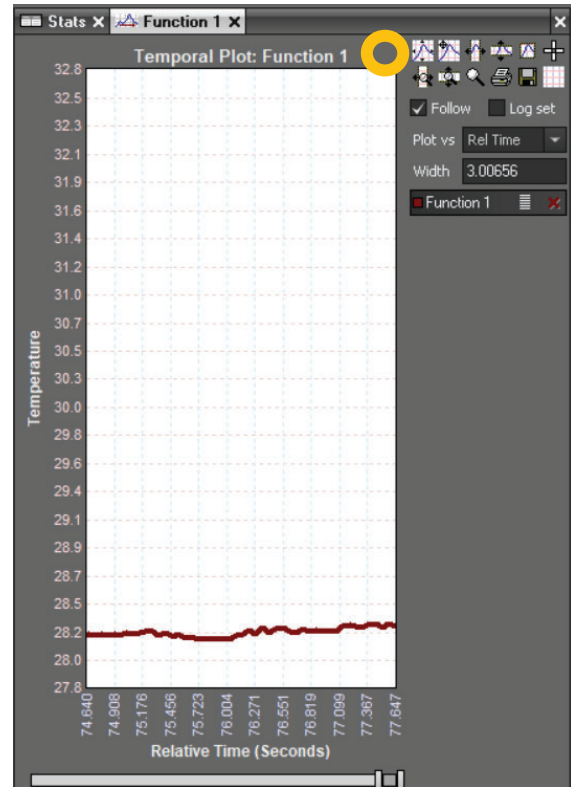


Ilustración 110. Captura de FLIR ResearchIR Max. Menú de opciones para guardar el gráfico.

Para mayor información consultar el manual oficial del producto [26].