

# PROYECTO **TrialPro**

**PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO FINAL EN SERVICIO DE PIEZAS DE SERIE, DE METAL O PLÁSTICO, A PARTIR DE PROTOTIPOS FABRICADOS MEDIANTE TÉCNICAS DE RAPID MANUFACTURING.**

## ***HITO 3***

***Caracterización básica de materiales de sinterizado de piezas de metal y su relación con materiales procesados mediante procesos estándar.***

**Responsable de proyecto: ASERM**

**Coordinador Hito 3: Universitat de Girona (UdG)**

Programa Nacional de Diseño y Producción Industrial.

Dirección General de Desarrollo Industrial.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

Número de identificación: FIT-020400-2007-313.

## Índice.

- **Antecedentes**
- **Definición de ensayos según campo de aplicación.  
Selección de parámetros de sinterizado.**
- **Fabricación de probetas de ensayo normalizadas en diferentes tecnologías de sinterizado en metal.**
- **Ensayos de las probetas obtenidas.**
  - **Análisis dimensional**
  - **Ensayos de Rugosidad**
  - **Ensayos de Tracción.**
  - **Ensayos de Flexión.**
  - **Imágenes de Porosidad.**
- **Anexo rugosidad**
- **Anexo tracción**
- **Anexo flexión**
- **Anexo comparativo**
- **Imágenes porosidad**

## **Antecedentes.**

El objetivo que se lleva a cabo en el proyecto TrialPro y centrándonos en el hito 3, es la caracterización básica de materiales de sinterizado de piezas metálicas y su relación con materiales procesados mediante procesos estándar. Para hacer esta caracterización se han utilizado las tecnologías DMLS, LASER CUSING y SLS METAL que sinterizan metal directo e indirecto, respectivamente, a través del láser.

La coordinación del proyecto ha sido llevada a cabo por el Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) de la Universitat de Girona (UdG).

Para la realización y/o ejecución del proyecto se ha estructurado en distintas fases que han ayudado a llevar a cabo el proyecto TrialPro. Las fases son las siguientes:

1. Definición de ensayos según campo de aplicación. Selección de parámetros de sinterizado.

Objetivo principal: Esta primera etapa tiene como objetivo principal determinar, en función de la aplicación industrial de las distintas piezas metálicas que se vayan a elaborar, qué ensayos físicos y/o mecánicos son los más adecuados para el estudio y cuales son los parámetros que se tienen que conocer del material.

La ejecución y/o resolución de esta tarea corresponde a las entidades de Enginyeria de Procés, Producte i Producció (GREP) de la Universitat de Girona (UdG), AIMME, FUNDACIÓN ASCAMM y FUNDACIÓN AITIIP.

2. Fabricación de probetas de ensayo normalizadas en diferentes tecnologías de sinterizado en metal.

Objetivo principal: Fabricar las probetas según las condiciones que se han definido en la descripción de parámetros de sinterizado y construirlas con las diferentes tecnologías mencionadas.

La ejecución de esta tarea concreta corresponde a las entidades FUNDACIÓN ASCAMM, AIMME y AIJU.

3. Ensayo de las probetas obtenidas.

Objetivo principal: Ensayar las probetas realizadas por las distintas tecnologías y por los distintos parámetros de fabricación según definición de ensayos. Graficar los resultados obtenidos de los ensayos.

La entidad responsable de esta tarea es el Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) de la Universitat de Girona (UdG).

## **Definición de ensayos según campo de aplicación. Selección de parámetros de sinterizado.**

El objetivo principal de la primera etapa es analizar que ensayos físicos y/o mecánicos son los más adecuados para el estudio para poder caracterizar el material en función de la aplicación industrial de las distintas piezas metálicas que se vayan a elaborar. La ejecución de esta tarea concreta corresponde a las entidades Enginyeria de Procés, Producte i Producció (UdG) de la Universitat de Girona (UdG), AIMME, FUNDACIÓN ASCAMM y FUNDACIÓN AITIIP.

Los ensayos definidos por las entidades fueron la realización de los ensayos a tracción, flexión, rugosidad y observar la porosidad, es decir, hacer unos ensayos destructivos y no destructivos para caracterizar el material. Todos los ensayos fueron realizados por la Universidad de Girona y siguiendo las recomendaciones de las normativas UNE correspondientes a cada uno de los ensayos.

Las tecnologías implicadas en este hito fueron las tecnologías de sinterizado de metal SLS, LASER CUSING y DMLS.

### **MODELO SLS**



#### **CARACTERÍSTICAS:**

- Laser de estado sólido CO<sub>2</sub> de 25 W
- 330x300x380 mm

#### **Materiales:**

- LaserForm ST-100
- LaserForm ST-200
- LaserForm A6

Tabla 1 Máquina SLS (AIJU)

### MODELO LASER CUSING M3 Linear



#### CARACTERÍSTICAS:

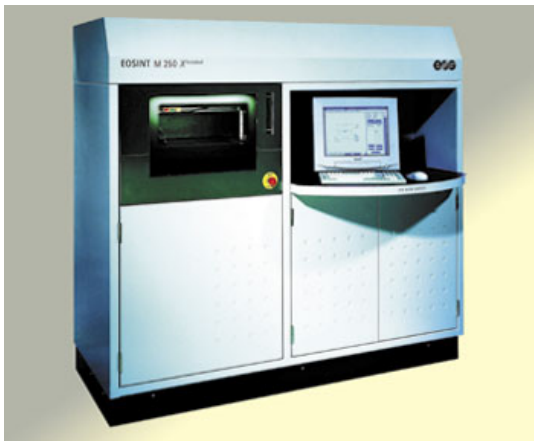
- Potencia: 107 W
- Área de construcción: 300 x 350 x 300 mm.

#### Materiales:

- CL 20ES
- CL 50WS
- CL 90RW
- CL 91RW

Tabla 2 Máquina Laser Cusing (AIMME)

### MODELO EOSINT M250 XTENDED



#### CARACTERÍSTICAS:

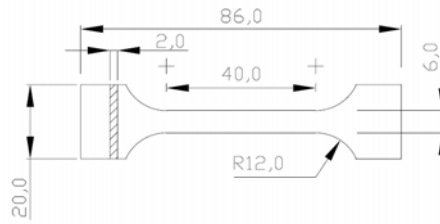
- Potencia láser: 200W CO2
- Área de construcción: 250 x 250 x 215 mm.

#### Materiales:

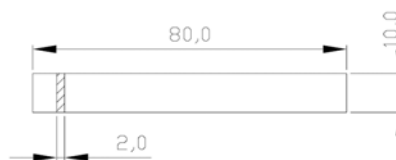
- DirectMetal 20
- DirectSteel H20
- EOS StainlessSteel 17-4
- EOS CobaltChrome MP1
- EOS CobaltChrome SP1
- EOS Titanium Ti64 / Ti64ELI
- EOS MaragingSteel MS1

Tabla 3 Máquina DMLS (ASCAMM)

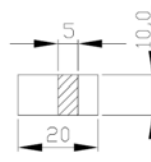
Considerando las limitaciones del área de construcción de las distintas máquinas y las restricciones del proyecto se construyeron 4 placas por cada tecnología con distintos parámetros de construcción. Cada placa contiene 5 probetas de las cuales hay 2 probetas de tracción fabricadas a 0° y a 90°, 2 de flexión también fabricadas a 0° y a 90° y finalmente 1 probeta de porosidad tal y como se muestra en las siguientes figuras.



Probeta 1: tracción



Probeta 2: flexión y rugosidad



Probeta 3: porosidad

Los parámetros que se decidió evaluar fueron los siguientes, de forma que cada tecnología tendría unos valores estándar determinados por su tecnología:

- Dos niveles de velocidad del láser, una velocidad es la estándar de la máquina y el otro nivel aproximadamente un 20% más rápido.
- Dos niveles de espesor de capa, un espesor es el estándar y el nivel superior con un aumento del 75% respecto al estándar según tecnología.
- Dos niveles de orientación según eje Y. La orientación es de 0° (probeta apoyada plana) y de 90°. Se utiliza la misma placa para construir las probetas de 0° y de 90°.

Los parámetros que se decidió fijar para la construcción de las probetas para tener unos parámetros comparativos de las distintas tecnologías y poderlas analizar fueron:

- Un material similar en cada una de las tecnologías, en este caso se decidió que las propiedades fueran parecidas al acero inoxidable.
- Utilizar la potencia estándar de la máquina.
- Temperatura óptima según material y tecnología.
- Otros parámetros según tecnología.

Según los parámetros de fabricación se construyó una tabla para realizar las distintas placas y ordenarlas para evitar confusiones a la hora de hacer los ensayos.

Variantes a ensayar y asignación de probetas a fabricar		
	Velocidad (Nivel 1)	Velocidad 2 (Nivel 2)
Espesor capa nivel bajo (Nivel 1)	P1	P3
Espesor capa nivel alto (Nivel 2)	P2	P4

Tabla 4: Asignación de los parámetros de las placas

Para la construcción de las probetas se propuso un esquema para que todas las tecnologías hicieran la misma distribución de las probetas y evitar así que hubiera diferencias y que pudiera suponer un cambio de las propiedades físicas y/o mecánicas de estas.

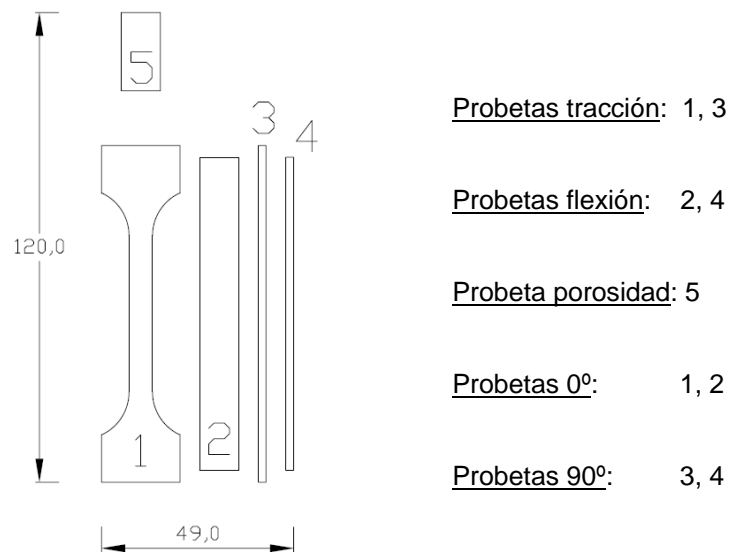


Tabla 5: Placa estándar para las probetas.

Para garantizar los resultados obtenidos en los ensayos, fue recomendado etiquetar las probetas según la placa y el ángulo de construcción, es decir, utilizando la Tabla 4 y la Tabla 5 por así solucionar el problema de la nomenclatura. Primero se propuso poner el número de la placa en que se había construido (P1, P2, P3, P4) y después la numeración dentro de la placa, es decir, el número de la probeta (1, 2,..., 5).

Ejemplo: P1.1, P1.2,.. , P4.5

## **Fabricación de probetas de ensayo normalizadas en diferentes tecnologías de sinterizado en metal.**

El objetivo principal de esta fase es fabricar las diferentes probetas bajo diferentes parámetros de proceso, es decir, bajo los parámetros definidos en la asignación de los parámetros de las placas. De este modo pudimos establecer una comparación entre los distintos parámetros de construcción de la misma tecnología y/o equivalencia con las otras tecnologías. La fabricación de las probetas se realizó en AIJU, Fundación ASCAMM y AIMME.

Las probetas fabricadas con la tecnología **SLS** (Sinterizado Selectivo Láser), fabricada en AIJU, son unas probetas que han sido fabricadas con una técnica de adición de capas que utiliza un láser de alta potencia que funde pequeñas partículas de metal. Cuando ha terminado una superficie entera, el rodillo añade una nueva capa de material y procede a sinterizar la siguiente sección. Para terminar es necesario hacer un segundo proceso de horneado y eliminar adhesivo que esta mezclado con el metal.

Las probetas fabricadas con la tecnología **DMLS** (Sinterizado Directo de Metal por Láser), fabricada en ASCAMM, es una técnica que permite realizar piezas con la técnica de adición de capas. Mediante un láser se incide de forma selectiva sobre las partículas de metal que se funden parcialmente formando la pieza a obtener.

Las probetas fabricadas con la tecnología **LASER CUSING** (Fusión de polvo metálico) son construidas mediante la fundición de polvo metálico en una atmósfera inerte directamente por la acción de un láser, una vez se ha fundido la primera capa se añade otra y se vuelve a fundir. El láser funde el polvo de un solo componente hasta conseguir una densidad del 100%.

## **Ensayos de las probetas obtenidas**

El objetivo principal de esta fase fue ensayar las distintas probetas de cada tecnología. De los ensayos se obtuvieron unos resultados que nos permitieron establecer comparativas entre las distintas probetas de la misma tecnología como también poder compararlas con las equivalentes de las otras tecnologías. La responsabilidad de esa tarea recayó en el Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) de la Universitat de Girona que realizó todos los ensayos.

Las fotografías de los poros se realizaron en los Laboratoris Generals de Recerca (Laboratorios Generales de Recerca) de la Universitat de Girona con el microscopio óptico Carl Zeiss Jenavert.

Los ensayos de tracción se realizaron en los laboratorios de Ciència dels materials i enginyeria metal·lúrgica (Ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica) del área de Física de la Universitat de Girona con la máquina AUTOGRAPH AG-IS 50KN SHIMADZU.

Los ensayos de flexión se realizaron en los laboratorios de Ciència dels materials i enginyeria metal·lúrgica (Ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica) del área de Física de la Universitat de Girona con la máquina universal de ensayos INSTRON 1122.

Los ensayos de rugosidad se realizaron en los laboratorios de metrología de la de la Universitat de Girona con la máquina de medición de rugosidad MITUTOYO SURFEST SV-2000.

### Análisis dimensional

Se realizaron mediciones dimensionales de todas las probetas fabricadas del ancho y espesor en la zona funcional de las mismas para determinar la precisión de las distintas tecnologías.

Se utilizó un pie de rey DIN 862 con un rango de medición de 150mm y con una resolución de 0.01mm. El pie de rey es el modelo MML Digital Caliper Digimatic.



	Desviación ancho DMLS	Desviación espesor DMLS	Desviación ancho LASER CUSING	Desviación espesor LASER CUSING	Desviación ancho SLS	Desviación espesor SLS
P1.1	0,43	0,12	-0,05	-0,11	1,10	-0,20
P1.2	0,4	-0,05	-0,1	-0,06	0,92	0,36
P1.3	0,05	0,47	0,06	-0,09	1,06	0,09
P1.4	0,01	0,4	-0,04	0,04	0,85	0,46
P2.1	0,56	0,02	-0,06	-0,05	0,90	0,10
P2.2	0,6	0,04	0,1	0,05	1,01	0,30
P2.3	0,18	0,68	0,3	-0,02	1,07	0,44
P2.4	0	0,35	0,6	0,02	0,95	0,32
P3.1	0,44	-0,05	-0,02	-0,04	No fabricada	No fabricada
P3.2	0,43	0,04	0	0,05	0,88	0,35
P3.3	0,03	0,48	0,05	0	0,96	0,38
P3.4	-0,01	0,42	0,05	0,03	0,96	0,30
P4.1	0,43	-0,07	0,11	0,11	1,04	0,34
P4.2	0,5	0,03	0,11	0,09	1,05	0,31
P4.3	0,03	0,58	0,06	-0,06	1,00	0,39
P4.4	0,02	0,53	0,19	0,14	1,15	0,23

De las mediciones obtenidas se puede observar las siguientes conclusiones:

- Se encontró una gran variabilidad de los valores obtenidos respecto a los valores nominales fijados en el CAD en las tecnologías DMLS y SLS.
- En las tecnologías DMLS y LASER CUSING se ha observado que se obtiene una mejor precisión en la construcción cuando se utiliza el nivel de espesor bajo. Cuando se aumenta el espesor de capa hay un decrecimiento de la precisión.
- No se han observado diferencias significativas en aspectos dimensionales en la creación de las probetas según el ángulo.

Otras conclusiones más específicas se presentan a continuación:

- En las dimensiones de espesor y de ancho se ha observado que hay valores inferiores y superiores al nominal para las tecnologías DMLS y LASER CUSING, por otra parte, la tecnología SLS se ha sobredimensionado respecto a la nominal.
- La tecnología SLS casi tiene el 2,5 veces más de imprecisión respecto a la tecnología DMLS y 7 veces más de imprecisión que la tecnología LASER CUSING.

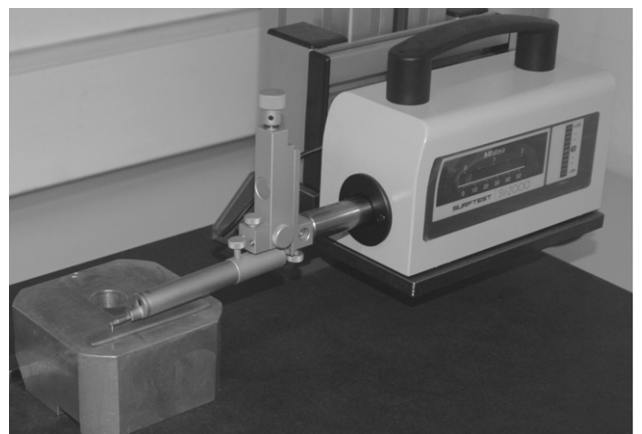
## Ensayos de rugosidad

Se han realizado atendiendo a las recomendaciones según normativa UNE 82301:1986 Rugosidad superficial. Parámetros, sus valores y reglas generales para la determinación de las especificaciones. La máquina que se ha utilizado para obtener la rugosidad superficial de las probetas es el rugosímetro Mitutoyo modelo Surfest SV-2000. Durante el ensayo de las probetas se utilizaron los parámetros establecidos ateniendo a la normativa. La longitud de medición fue de 40mm, la longitud de muestreo de 12,5mm y la longitud de evaluación de 2,5mm. La velocidad de ensayo fijada fue de 2mm/s con la medición de los puntos cada 4 $\mu$ m con una cantidad total de 10.000 puntos. La aguja palpadora se pasó dos veces por probeta y se utilizó la media de los 2 valores para generar todas las gráficas correspondientes a la rugosidad superficial.

Con la realización del ensayo de rugosidad se han calculado muchos parámetros pero únicamente se ha utilizado la media aritmética de la rugosidad (Ra) ya que es el valor representativo de la rugosidad porque es el valor medio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad de la línea intermedia de la longitud de medida. El valor medio de la rugosidad es idéntico a la altura de un rectángulo donde la longitud es igual a la longitud total de evaluación y asimismo es idéntico a la superficie de la suma que existe entre el perfil de la rugosidad y la línea intermedia.

La rugosidad fue calculada con las probetas 2 y 4 de cada placa, de esta forma se calculó la rugosidad en los dos sentidos de crecimiento de cada tecnología.

En el anexo de rugosidad se pueden observar todos los perfiles analizados por el rugosímetro Mitutoyo Surfest SV-2000.



## Ensayo de tracción

Se han realizado atendiendo a las recomendaciones según normativa UNE-EN 10002-1:2002 *Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente*. La máquina que se ha utilizado para obtener los datos respecto a la resistencia a tracción es la máquina AUTOGRAPH AG-IS 50KN SHIMADZU.

La velocidad de ensayo fue de 2mm/min con una fuerza máxima de 50KN. Los datos de fuerza – desplazamiento se filtraron para eliminar los valores atípicos y se generó las gráficas que aparecen en el anexo.

El software informático nos calculaba los siguientes parámetros representativos del ensayo:

- Módulo de elasticidad tangente a 10kN.
- Fuerza máxima y tensión máxima.
- Fuerza y tensión en la rotura.
- La energía aportada hasta la rotura.

En el anexo de tracción se encuentran las gráficas y los valores obtenidos de los ensayos, asimismo se encuentran también las gráficas comparativas del módulo de Young de las distintas tecnologías para poderlas comparar.



En la tecnología LASER CUSING se observa que hay probetas que tienen una deformación plástica o de fluencia bastante grande pero no apareció la zona donde se produce la fractura donde se reduce la sección. Esto se corresponde a un comportamiento dúctil pero solo se mantiene en una sola placa de manera que se puede entender que es debido a las propiedades de esta.

## Ensayo de flexión

Se han realizado atendiendo a las recomendaciones de la normativa ISO 2740:2007 *Materiales sinterizados metálicos excluyendo metales duros*. La máquina que se ha utilizado para obtener los datos respecto a la resistencia a flexión es la máquina universal de ensayos INSTRON 1122.

La velocidad de ensayo fue de 2mm/min. con una fuerza máxima de 5000N y un desplazamiento de 25mm. La distancia final establecida por el apoyo de los utillajes fue de 55,88 mm. Con los datos de fuerza – desplazamiento se generaron las gráficas.

El software informático nos calculaba los siguientes parámetros representativos del ensayo:

- Resistencia a flexión
- Fuerza máxima
- Extensión máxima
- Modulo de Elasticidad
- Modulo de Young

En el anexo de flexión se encuentran las gráficas y los valores obtenidos de los ensayos, asimismo se encuentran también las gráficas comparativas del módulo de Flexión de las distintas tecnologías para poderlas comparar.

De todas las probetas de flexión ensayadas, no rompieron 3 de las cuales no se tienen los resultados ya que el programa no llego al final y no pudo obtener el resultado.



## Ensayo de porosidad

Las fotografías de los poros se realizaron en los Laboratoris Generals de Recerca (Laboratorios Generales de Recerca) de la Universitat de Girona con el microscopio óptico Carl Zeiss Jenavert para poder observar las dimensiones y los tipos de poros de cada placa con los distintas tecnologías.

Para observar los poros de las tecnologías DMLS y LASERCUSING se utilizaron lentes de 5 aumentos mientras que para la SLS fue necesario utilizar la lente de 10 aumentos.