



Universitat de Girona

CONTRIBUCIÓN A LA FUNDICIÓN SELECTIVA POR LÁSER DE PIEZA METÁLICA MEDIANTE EL ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE MANUFACTURA

Jordi DELGADO i SANGLAS

Dipòsit legal: Gi. 993-2013

<http://hdl.handle.net/10803/117376>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'exploració efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



UNIVERSITAT DE GIRONA

TESIS DOCTORAL

Contribución a la fundición selectiva
por láser de pieza metálica mediante el
estudio de propiedades mecánicas y de
manufactura

Doctorando: Jordi Delgado Sanglas

Director: Dr. Joaquim de Ciurana Gay

Programa de Doctorado en Turismo, Derecho y Empresa

Doctor por la Universitat de Girona

2013

Memoria presentada para optar al título de doctor por la Universitat de Girona

Als meus i a tots aquells que
m'heu estat fent costat en tot moment

Trencar aquest desencert,
converses d'un mateix,
tornem a les arrels,
dels somnis que ens van veure néixer
Tornarem a ser grans, hi tornarem,
quan sortim d'aquesta tempesta,
que amaguem rere rostre indiferent,
però cou i ens fa sentir que hi tornarem...

“Tornarem - Lax'n'Busto”

Agradecimientos

Al director de tesis, el Dr. Quim de Ciurana que me ha guiado durante estos años. Le agradezco especialmente su paciencia, esfuerzo e insistencia porque esta tesis fuese posible y sobretodo porque nunca me ha faltado nada para poder avanzar en el camino.

A la gente que están actualmente o que han pasado por el GREP durante la realización de la tesis y que de una forma u otra han contribuido a que fuera realidad, la Dra. M.Luisa Garcia-Romeu, la Dra. Inés Ferrer, el Dr. Rudi de Casto, el Dr. Martí Casadesús, el Dr. Guillem Quintana, el Dr. Robert Blanch y la Dra. Lidia Serenó que han permitido que mi estancia en el grupo fuera más ligera. Sin olvidar a todas aquellas personas que han estado a mi lado en todo momento, Dani Teixidor, Karla Monroy, Francesc Tauler, Isabel Bagudanch, Elisa Vázquez y Jordi Grabalosa. También quería agradecer a aquellas personas que han pasado y que ya se han ido del grupo de investigación pero que han contribuido con su granito de arena, Xevi Gómez, Guillem Vallicrosa, Anna Ymbern, Alexis Pérez, Narcís Pellicer, Sílvia Míguez y Bernardo Providência

A Marc Sabater, Mercè Bernardo, Catalina Pérez, Marta Albertí, Marta Reig y Àlex Barrio que hemos coincidido en algún lugar y que ha servido para intercambiar palabras y opiniones, otros porque han hecho que los procesos de fabricación me abrieran la inquietud para realizar el proyecto final de carrera y que finalmente, investigar el proceso de fabricación forme parte de esta tesis. Con cada uno de vosotros he aprendido muchas cosas que han permitido que este proyecto fuera avanzando. Gracias.

A la gente de ASCAMM, especialmente a Xavier Plantà, Joan Guasch, Benjamín Cavallini y Pol Palouzie, que con su ayuda y sus valiosas respuestas a mis preguntas me han ayudado a dar forma a los trabajos iniciales con las tecnologías por adición de capas, sin ellos, esta tarea hubiera sido mucho más difícil. También agradecer a todos los socios de ASERM.

Quiero agradecer a Aitzol Lamikiz, de la Universidad del País Vasco, que me permitieran realizar una estancia de investigación en su departamento, por haberme

dedicado su tiempo y por haberme facilitado los recursos necesarios para realizar la experimentación de la tecnología láser cladding. A Iván Tabernero de la UPV, por su colaboración en la realización de la experimentación y a toda la gente que trabajamos codo a codo.

También me gustaría agradecer a la gente de la División de Tecnologías Tridimensionales (DT3D) del Centro de Tecnología de la Información Renato Archer (CTI) de Brasil, especialmente al Dr. Jorge da Silva, Dr. Pedro Noritomi y especialmente para Cesar Laureti por todo el tiempo que invirtieron en mí y me ayudaron en el proyecto, muchas gracias.

A aquellas personas que han realizado una estancia de investigación en la Universidad de Girona a través del proyecto IREBID y que han contribuido a que el proyecto fuera avanzando de forma más ágil, algunos trabajamos en la misma línea, otros coincidimos en reuniones y en los cafés del grupo, aun así, algunas ideas y soluciones han salido de estas conversaciones que hemos tenido al largo de vuestra estancia, muchas gracias Dr. Rogelio, Dr. Luis, Evila Melgoza y Alan Amaro.

Agradecer el grupo de trabajo que se ha establecido en la área de AM ya sea continuando o ayudando en la experimentación sobre la fundición selectiva por láser, deseo que el rigor en el trabajo e interés en la investigación continúe, muchos ánimos en vuestro futuro Yurivania Pupo, Karla Monroy, Daniel Takanori y Andrea Rota.

Finalmente agradecer a toda mi familia que me ha estado apoyando en todo momento y se han ido interesando en todo momento en el estado de la tesis. Mi padre, mi madre, mi hermano, mi cuñada, mis abuelos y al resto de la familia. Algunos de vosotros os habéis ido pero tengo presente que habéis estado en todo momento a mi lado. También agradecer especialmente a Laura, que en los momentos buenos y en los malos has estado a mi lado, sin tu ayuda no hubiera sido posible todo este trabajo, por lo tanto, estos agradecimientos también van por ti.

Listado de símbolos

A	Absorción [%]
A_t	Sección derretida [m^2]
A_{cs}	Sección derretida cordón superior [m^2]
C_p	Capacidad calorífica [$m^2 s^{-2}K^{-1}$]
E_d	Densidad de energía [J/m^3]
I	Distribución de la intensidad [$kg s^{-3}$]
$I(r)$	Distribución de intensidad radial
I_f	Calor latente de fusión [cal/kg]
L_t	Grosor de capa de polvo [m]
M^2	Calidad del haz
O	Superposición [%]
P_L	Potencia del láser [$kg m^2 s^{-3}$]
r	Radio del haz [m]
R_0	Radio del haz mínimo [m]
R	Reflexión [%]
S_s	Distancia de separación entre barridos de láser [m]
SS	Velocidad de escaneo [$m s^{-1}$]
T_b	Temperatura del polvo [K]
T_m	Temperatura de fusión [K]
V_t	Velocidad de construcción total [$m^3 \cdot s^{-1}$]
V_{cs}	Velocidad de construcción cordón superior [$m^3 \cdot s^{-1}$]
W_c	Ancho del cordón [m]
Z	Distancia perpendicular al centro de focalización [m]

Z_r	Campo de Rayleigh [m]
ρ	Densidad [kg m^{-3}]
ϕ_l	Diámetro del láser [m]
λ	Longitud de onda [m]

Lista de acrónimos

AFF	Additive Freeform Fabrication
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing File
ASCAMM	Associació Catalana de Motlles i Matrius
ASERM	Asociación Española de Rapid Manufacturing
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
TC	Tomografía Computarizada
DFA	Design For Assembly
DFE	Design For Environment
DFM	Design For Manufacturing
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly
EBM	Electron Beam Melting
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
FDM	Fused Deposition Modelling
FEA	Finite Element Analysis
FFF	FreeForm Fabrication
GREP	Grup de Recerca en Enginyeria del Producte, Procés i Producció
ISF	Incremental Sheet Forming
LCA	Life Cycle Analysis
LDMD	Laser Direct Metal Deposition

LM	Layer Manufacturing
LOM	Laminated Object Manufacturing
MRI	Imágenes por resonancia magnética
PPC	Production Planning Control
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SFF	Solid Freeform Fabrication
SLA	StereoLithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language format
3DP	Three Dimensional Printing

Resum

Les tecnologies per addició de capes, normalment conegudes amb el nom de impressores 3D, s'han introduït en el mercat per satisfer la demanda de peces personalitzades amb una alta complexitat geomètrica i de petites sèries, és a dir, productes amb un alt valor afegit i que les actuals tecnologies, degut al procés de fabricació, tenen un alt cost de producció o un temps de cicle de producció molt llarg.

La fabricació mitjançant l'aportació per addició de capes permet traslladar el disseny 3D en un model físic de forma ràpida i a través d'un procés relativament simple. Primerament, el disseny en 3D és dividit en diferents seccions 2D, paral·lels entre ells i amb una altura de capa finita, després, aquesta informació és enviada a la màquina, la qual a partir de la sobreposició i unió d'aquestes seccions, finalment s'obté la peça final.

Des de mitjans dels anys 80, quan va aparèixer la primera màquina de producció per addició de capes, s'han desenvolupat multitud d'investigacions que han permès expandir l'aplicació del procés i utilitzar les peces d'aquest procés des de prototips fins a peces totalment funcionals. Aquests avanços s'han realitzat a través de diferents camps d'investigació, des del desenvolupament i introducció de nous materials, l'estudi del rendiment dels làsers però, sobretot, en l'estudi dels efectes dels paràmetres de procés en el producte final.

A més a més, aquest tipus de procés per addició de capes simplifica el procés per l'obtenció de peces complexes perquè les fabrica directament des d'un model en 3D sense la necessitat d'eines. Tanmateix, en el procés de sinterització o fundició selectiva es necessari estudiar com es realitzen les línies, la sobreposició de línies i finalment la sobreposició de capes per obtenir l'objecte físic final. Conseqüentment, sorgeix la necessitat dels investigadors en estudiar aquest tipus de procés de producció ja que existeix una gran varietat de paràmetres que tenen influència i fa que hi hagi una gran dificultat en predeterminar, per a cada un d'ells, els valors més adequats per obtenir el model.

Per aquest motiu, l'objectiu general d'aquesta tesi es contribuir en l'augment del coneixement en la sinterització i la fundició selectiva per làser de peces metàl·liques. Inicialment, s'avalua la influència dels paràmetres a través d'una experimentació en un pla inclinat, de manera que es pot analitzar la inestabilitat del procés i la geometria del cordó generat a fi d'evitar cordons no continus. En segon lloc s'utilitzen les màquines comercials per a la fabricació de provetes d'assaig modificant diferents paràmetres del procés i analitzar les propietats mecàniques, dimensionals i físiques de les provetes. A continuació es fabriquen, mitjançant la fundició selectiva per làser, rèpliques de productes que utilitzen les tecnologies convencionals per tal de comparar-ne els resultats. Finalment, es realitza un cas d'estudi per demostrar com es pot fabricar peces personalitzades mitjançant les tecnologies additives, obtenint un producte amb un alt grau de valor afegit, complexitat geomètrica i una alta carga de disseny a través del tractament de la informació.

Resumen

Las tecnologías por adición de capas, comúnmente llamadas impresoras 3D, se han introducido en el mercado para satisfacer la demanda de piezas personalizadas con una alta complejidad geométrica y de pequeñas series, es decir, productos con un alto valor añadido y que las actuales tecnologías, debido a su proceso de fabricación, tienen un alto coste o un tiempo de ciclo de producción muy largo.

La fabricación mediante la aportación de capas permite trasladar un diseño en 3D a un modelo físico de forma rápida y a través de un proceso relativamente simple. Primeramente, el diseño en 3D es dividido en distintas secciones 2D, paralelas entre ellas y con una altura de capa finita, después, esta información es enviada a la máquina, la cual, a partir de la superposición y unión de éstas secciones, finalmente se obtiene la pieza.

Desde mediados de los 80s, cuando apareció la primera máquina de adición de capas, se han desarrollado multitudes de avances que han permitido expandir la aplicación de las tecnologías y utilizar las piezas obtenidas para prototipos e incluso para piezas totalmente funcionales. Estos avances han abarcado distintos campos de investigación, desde el desarrollo e introducción de nuevos materiales, el estudio en el rendimiento del láser pero sobretodo, en el estudio de los efectos de los parámetros del proceso en el producto final.

Además, el proceso por adición de capas simplifica el proceso de producción para obtener piezas complejas ya que la fabricación se realiza directamente desde un modelo en 3D sin la necesidad de herramientas. Asimismo, en el proceso de sinterización o fundición selectiva es necesario estudiar cómo realizar las líneas, la superposición de líneas y finalmente la superposición de capas para obtener el objeto físico final. Consecuentemente, surge la necesidad de estudiar este proceso de producción ya que existe multitud de parámetros que tienen influencia y hace imperioso establecer, en cada uno de ellos, los valores adecuados para obtener el modelo.

Por este motivo, el objetivo general de esta tesis plantea contribuir en el aumento del conocimiento en la sinterización y la fundición selectiva por láser de piezas metálicas.

Inicialmente, se evalúa la influencia de los parámetros a través de una experimentación con un plano inclinado, pudiendo analizar la inestabilidad del proceso y la geometría del cordón, con el fin de evitar cordones no continuos. En segundo lugar, se utilizan máquinas comerciales para la fabricación de probetas de ensayo y se modifican diferentes parámetros del proceso, evaluando las propiedades mecánicas, dimensionales y físicas de las probetas. A continuación se fabrican, mediante la fundición selectiva por láser, réplicas de productos que utilizan las tecnologías convencionales para comparar el comportamiento entre ambos procesos. Finalmente, se realiza un caso de estudio para demostrar cómo se puede fabricar piezas personalizadas mediante las tecnologías aditivas, obteniendo un producto con un alto valor añadido, complejidad geométrica y con una alta carga de diseño a través del tratamiento de la información.

Abstract

Additive manufacturing technologies, typically called 3D printers, have been introduced in the market to satisfy the demand of manufacturing small series of high geometric complex objects, for example, products with high added value which are very expensive to produce or need long cycle times to be fabricated using current traditional technologies.

The layer-by-layer fabrication permits to generate quickly a physical model from a 3D design through a relatively simple process. First, the 3D design is divided into different sections, parallel between them, with a finite layer. Then, this information is sent to the machine which overlaps and joins single tracks to form a layer. Finally, the final object or part is formed by overlapping layers.

Since mid-80s many layer-by-layer technologies and machines have been developed and introduced into the market. Technological progress concerning the additive process has permitted to increase the applications of these technologies, which were initially intended only to produce prototypes. These advances have covered different fields of research, from the development and introduction of new materials, to the study of laser performance, and in particular, the study of the effects of process parameters on the final product.

Although the manufacturing process of adding layers simplifies the production of complex parts, because the 3D model is created directly without tools, it is necessary to study the process of dividing the design in lines, overlapping these lines and finally overlapping layers to obtain the final physical object. Thus, from a scientific point of view, it is very interesting for researchers to study this type of production process as there are a variety of parameters that may influence the final part and it is difficult to establish, for each one, its proper value.

Therefore, the overall aim of this thesis is to contribute to the growth of knowledge in selective laser sintering and melting of metal parts. Initially, the influence of several process parameters was evaluated. For this, an inclined plane platform, which permitted the

analysis of the process instability and the geometry of simple tracks, was used. Secondly, test specimens were manufactured using various commercial technologies and changing different process parameters to further evaluate mechanical, dimensional, and physical properties. In addition, commercial products were manufactured using both traditional and additive manufacturing technologies, and their mechanical behavior was compared. Finally, a case study was carried out to demonstrate the feasibility of using an additive technology to produce a product with high added value, high geometric complexity, and high design burden and information processing.

Resumo

As tecnologias por manufatura aditiva, comumente chamadas de impressão 3D, têm sido introduzidas no mercado para atender a demanda de peças personalizadas com alta complexidade geométrica e pequenas séries, ou seja, produtos com alto valor agregado os quais se fossem fabricados com as tecnologias atuais, devido ao seu processo de fabricação, teriam um custo elevado ou o tempo do ciclo de produção muito longo.

A produção usando a adição das camadas permite transformar um desenho CAD até um modelo físico rapidamente e por um processo relativamente simples. Primeiro, o projeto 3D é dividido em seções distintas, incluindo camadas paralelas 2D com uma altura da camada definida, então esta informação é enviada para a máquina na qual mediante a sobreposição ou a união dessas seções, obtém-se finalmente a peça terminada.

Desde meados dos anos 80, onde houve a primeira aparição de máquinas de produção por adição de camadas, foram desenvolvidos muitos de avanços que permitiram ampliar a aplicação da tecnologia com a obtenção de peças protótipos para a fabricação das peças totalmente funcionais. Estes avanços são feitos abrangendo-se diferentes áreas de pesquisa, do desenvolvimento e da introdução de novos materiais, do estudo sobre o desempenho da tecnologia à laser, mas especialmente no estudo dos efeitos dos parâmetros do processo sobre o produto final.

O processo por adição de camadas simplifica a produção de peças complexas como a fabricação direta à partir de um modelo 3D, sem ferramentas, contudo é necessário estudar o modo como fazer as linhas, linhas sobrepostas e, finalmente, a sobreposição de camadas para obter o objeto físico final. Conseqüentemente, surge a necessidade de os pesquisadores estudarem este processo de produção, pois há grande número de parâmetros de influência e torna imperativo para estabelecer, em cada uma delas, os valores adequados para o modelo anterior.

Portanto, o objetivo geral desta tese propõe a contribuição para o crescimento do conhecimento, sinterização e fusão seletiva à laser de peças metálicas. Inicialmente, é

avaliada a influência dos parâmetros através da experimentação com um plano inclinado, analisando-se e processando-se a instabilidade da geometria do cordão único, a fim de evitar cordões não contínuos. Em segundo lugar, por meio da fabricação de peças de ensaio e utilizando várias tecnologias comerciais, mudam-se vários parâmetros do processo e são avaliadas as propriedades mecânicas, dimensionais e físicas. Em conjunto com a realização de uma réplica de produtos comerciais fabricados utilizando as tecnologias tradicionais é feita uma comparação entre o comportamento das peças produzidas utilizando a tecnologia da adição de camadas. E, finalmente, é preciso um estudo de caso para demonstrar a viabilidade do uso de tecnologia de aditivos para a produção de um produto de alto valor agregado e complexidade geométrica elevada com uma grande carga de projeto e processamento da informação.

Tabla de Contenido

Listado de símbolos	xv
Lista de acrónimos	xiii
Resum	xv
Resumen.....	xvii
Abstract.....	xix
Resumo.....	xxi
Tabla de Contenido	xix
Capítulo 1. Introducción.....	25
1.1. Marco conceptual	25
1.2. Marco histórico.....	27
1.3. Interés y motivación.....	30
1.4. Objetivo de la tesis	32
1.5. Medios utilizados en la realización de la tesis.....	34
Capítulo 2. SLM - Estado del arte.....	35
2.1 Introducción al AM.....	35

2.1.1 Proceso básico de la construcción en AM	38
2.2 Diferencia entre SLS y SLM	41
2.3 Parámetros	44
2.4 Láser.....	46
2.4.1 Tipos de láser en AM.....	48
2.4.2 Componentes	49
2.4.3 Características del haz	50
2.4.3.1 Tipo de onda	50
2.4.3.2 Focalización y dimensión del haz láser	51
2.4.3.3 Calidad del láser	53
2.4.3.4 Potencia, densidad e intensidad.....	54
2.5 Parámetros de proceso	56
2.5.1 Velocidad de escaneo (SS)	58
2.5.2 Altura de capa de polvo (LT)	60
2.5.3 Estrategia de fabricación	64
2.5.3.1 Distancia y solapamiento de cordones	67
2.5.4 Deposición de material.....	70
2.5.5 Orientación en la fabricación	72
2.5.6 Atmosfera.....	73
2.5.7 Temperatura de la plataforma	74
2.5.8 Densidad de energía.....	75
Capítulo 3. Análisis morfológico SLM	77
3.1 Antecedentes.....	77
3.2 Diseño de experimentos.....	79

3.3 Material CoCrMo.....	83
3.4 Experimentación	85
3.5 Preparación de las muestras	87
3.5.1 Corte de las piezas.....	87
3.5.2 Montaje en resina	88
3.5.3 Pulido	89
3.6 Parámetros de salida	90
3.6.1 Continuidad del cordón.....	90
3.6.2 Perfil	95
3.6.2.1 Ángulo de contacto	97
3.6.2.2 Altura cordón.....	100
3.6.2.3 Anchura cordón	104
3.6.2.4 Profundidad de penetración	106
3.6.2.5 Área.....	107
3.6.2.6 Velocidad de construcción	112
3.6.3 Porosidad	115
3.6.4 Microdureza.....	121
3.7 Conclusiones	124
Capítulo 4. Caracterización mecánica del producto	127
4.1 Tecnologías	127
4.1.1 SLS – DTM Sinterization 2500.....	128
4.1.2 DMLS – EOS M250Extended	130
4.1.3 SLM – M3 Linear.....	130
4.2 Diseño de experimento	131

4.2.1 Composición química	133
4.3 Consistencia del proceso: Repetibilidad	134
4.4 Influencia de los parámetros.....	136
4.4.1 Error dimensional - e [%]	137
4.4.2 Porosidad	139
4.4.3 Rugosidad, Ra.....	143
4.4.4 Ensayo a tracción	145
4.4.5 Ensayo a flexión	149
4.4.6 Tiempo de fabricación	152
4.5 Conclusiones	154
Capítulo 5. Proceso tradicional vs proceso SLM	157
5.1 Introducción	157
5.2 Procedimiento.....	158
5.2.1 Obtención de la geometría	158
5.2.2 Material y fabricación de las piezas	160
5.3 Ensayo	162
5.3.1 Tracción	163
5.3.2 Compresión - Flexión.....	163
5.3.3 Compresión.....	164
5.3.4 Flexión.....	165
5.4 Resultados	166
5.4.1 Tracción	166
5.4.2 Compresión - Flexión.....	168
5.4.3 Compresión.....	169

5.4.4 Flexión.....	170
5.5 Conclusiones	171
Capítulo 6. El diseño en tecnologías AM: un caso práctico.....	173
6.1 Introducción.....	173
6.2 Metodología	175
6.2.1 Geometría 3D	175
6.2.2 Ingeniería inversa	176
6.2.3 Diseño Prótesis.....	177
6.2.4 Simulación	179
6.2.5 Fabricación	182
6.3 Resultados.....	183
6.4 Conclusiones	184
Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro	187
7.1 Proyectos y conclusiones	187
7.2 Principales contribuciones.....	190
7.3 Trabajo futuro	191
Capítulo 8. Referencias.....	195
Artículos:	196

Capítulo 1. Introducción

El capítulo 1 presenta el dominio general de la tesis doctoral y establece el marco histórico y conceptual de la aparición de la tecnología aditiva, además, también expone el interés, la motivación y los objetivos principales de la tesis.

1.1. Marco conceptual

Las actuales tendencias de la industria manufacturera se caracterizan por el aumento de la competencia en el mercado global, la complejidad y la personalización de los productos debido a las preferencias de los clientes, conjuntamente con la demanda de un menor coste y un menor tiempo de producción (Ghany & Moustafa, 2006; Rosochowski & Matuszak, 2000). Esto ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías para hacer una fabricación rápida, precisa y rentable siguiendo las premisas de las actuales tendencias con productos con un alto valor añadido.

Una de las tecnologías que permite realizar una fabricación, teniendo en cuenta las tendencias de la industria manufacturera mencionadas, es el proceso denominado actualmente *additive manufacturing* (AM), nombre comúnmente que engloba las tecnologías que utilizan la fabricación capa a capa y que permiten crear objetos físicos tridimensionales, directamente desde la información de un diseño en 3D.

Durante el desarrollo de las distintas tecnologías de AM a finales del siglo XX, conocidos también con los nombres de *freeform fabrication* (FFF), *layer manufacturing* (LM), *additive freeform fabrication* (AFF) o *solid freeform fabrication* (SFF) se incluyen numerosos procesos de fabricación. Las nomenclaturas y acrónimos omitían la introducción de procesos de fabricación tradicionales como el mecanizado de alta velocidad o procesos no tradicionales como la electroerosión.

A principios de los 90's (Sachs et al., 1990) se introdujeron la denominación a *rapid prototyping* (RP), *rapid tooling* (RT) y *rapid manufacturing* (RM), dependiendo del uso final de la pieza. La nomenclatura acordada durante este tiempo fue confusa porque podía incluir algunos procesos de AM en más de una clasificación y, además, se podían incluir tecnologías no aditivas al considerarse que eran de fabricación rápida (Ciurana et al, 2008). Finalmente, para solventar este problema, a principios del siglo XXI se acordó utilizar un nombre más genérico y a la vez restrictivo que incluyera únicamente la tecnología de adición, la actual nomenclatura AM. La principal característica de los procesos de AM es que la fabricación se realiza capa a capa, además, la mayoría de estos procesos permiten realizar cambios rápidos y dinámicos en el diseño, la personalización del producto, satisfaciendo así las demandas del mercado.

Actualmente, muchas de las piezas que se fabrican podría ser producidas utilizando alguno de los procesos de AM, no obstante, el precio del producto final sólo hace rentables aquellos productos con una alta complejidad, una producción muy baja y sobre todo aquellas piezas únicas con un alto valor añadido (Rosochowski & Matuszak, 2000; Paul & Baskaran, 1996).

Uno de los principales problemas de la tecnología de AM es que trabaja con una pequeña cantidad de materiales poliméricos, metálicos, cerámicos y/o compuestos. Este problema es debido a la complejidad para desarrollar nuevos materiales que se ajusten al proceso y sus exigencias, para encontrar los parámetros de fabricación y recibir la información de los parámetros si se quiere modificar los materiales estándares, dando lugar a máquinas cerradas, es decir, las máquinas van estrechamente ligadas a los materiales que los mismos fabricantes comercializan y que, si se quiere utilizar otro tipo de material, es necesario realizar un estudio de los parámetros a utilizar. Asimismo se entiende por máquina cerrada el hecho de la poca flexibilidad en la elección de los parámetros de proceso.

Por otro lado, normalmente el producto final debe cumplir unas exigencias para poder satisfacer las necesidades del mercado a través de propiedades mecánicas, físicas y/o químicas y, en parte, se realiza a través de la elección un material adecuado. Como que la variedad de materiales no es muy elevada puede suceder que el producto final no satisfaga los requerimientos o que, por otro lado, las propiedades sean mucho superiores a las que realmente necesita.

Por esta razón es primordial disponer de una base de conocimientos a fin de utilizar el material y los parámetros de proceso adecuados y obtener el comportamiento deseado, del

mismo modo que se requiere de la utilización de nuevos materiales con propiedades distintas a los materiales actuales. Existen multitud de procesos asociados a la tecnología de AM, la tesis contribuye en el estudio de las propiedades mecánicas en la fabricación de piezas metálicas utilizando la fundición selectiva por láser (SLM). En el proceso intervienen muchos parámetros entorno a la fabricación, des del propio láser, el material y los parámetros del proceso, por lo tanto, es importante saber el efecto que tienen cada uno de ellos en la pieza final.

1.2. Marco histórico

En 1917, Albert Einstein estableció los fundamentos teóricos del LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*) y el MASER (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) en el artículo Quantum Theory of Radiation (Einstein, 1917) siguiendo la ley que describió Max Planck, donde manifiesta que generalmente los electrones pueden absorber y emitir luz.

En realidad, los electrones emiten luz de forma espontánea sin la necesidad de una intervención externa, no obstante, Einstein predecía la posibilidad de estimular los electrones para que emitieran luz en una longitud de onda concreta. No fue hasta 1950 que no se empezó a pensar en la creación de un dispositivo que emitiera luz tal y como había predicho Einstein.

En el 1960, Theodore Maiman demostró el primer láser funcional en los laboratorios de investigación de Hughes. El material que utilizó fue un láser de rubí sintético formado por cromo con un mineral de óxido de aluminio denominado corindón. Maiman fabricó un pequeño mecanismo que consistía en un cilindro de cristal de rubí de aproximadamente un centímetro de diámetro, rodeado por una lámpara flash en forma de espiral, en el final del rubí tenía un espejo, elemento necesario para hacer la oscilación de la luz láser. Cuando el cristal recibía la emisión del flash, de una millonésima parte de segundo, el láser emitía una luz roja, en el espectro cuasi invisible, con un pulso de 10kW. La revista Physical Review Letters no consideró la publicación de interés y finalmente, se publicó en la Nature Publishing Group (Maiman, 1960). El trabajo de Maiman consistió en un escrito de 300 palabras, suficiente para poder reproducir el mismo experimento en otros laboratorios. A partir de este momento, empezó la aparición y la producción de los láseres.

Además del láser, a finales de los 60, los centros de mecanizado empezaron a ser controlados por ordenador y mejoró la eficiencia en la producción de piezas. Las máquinas eran capaces de completar las tareas con una gran precisión y coherencia comparadas con las máquinas manuales.

Durante los siguientes años, en la Universidad de Rochester, el ingeniero y profesor Herbert Voelcker desarrollo una teoría matemática y algorítmica que formó la base de los programas por computarización. Voelcker estaba particularmente interesado en la automatización de los procesos a partir de programas externos y estos servían para programar las máquinas de control numérico. El trabajo realizado por Voelcker se convirtió, a lo largo del 1970, en un estándar operacional y finalmente fue concluido con el desarrollo de los programas CAD (*computer aided design*) y CAM (*computer aided manufacturing*) que se conoce actualmente.

En el 1971, Frenchman Pierre Ciraud patentó (Ciraud, 1971) una aplicación que describía un método para la fabricación de piezas, con cualquier geometría, aplicando polvo de material en una superficie y solidificándola a través de la emisión de energía. El objetivo y sobretodo la idea básica de esta invención está relacionado muy estrechamente con el desarrollo actual de las máquinas de AM, el invento hacía posible la fabricación de piezas que tuvieran una gran complejidad sin la necesidad de la utilización de moldes.

En el 1977 se aceptó otra patente, en este caso de Housholder (Housholder, 1979), donde se describía el concepto de los sistemas *selective laser sintering* (SLS) y *selective laser melting* (SLM), es decir, la utilización de un láser para sinterizar o derretir el material respectivamente. Esta nueva idea no fue comercializada en su momento debido a los grandes problemas que había en la computarización de la información y el alto coste de los sistemas láser.

No obstante, Charles Hull en el 1984 (Hull, 1984) se dio cuenta que el concepto no estaba limitado a la sinterización o la fundición y, por lo tanto, apareció el nombre genérico de estereolitografía. Hull amplió la patente reclamando integrar cualquier material que fuese capaz de solidificarse o capaz de alterar su estado inicial.

En el 1986, en la Universidad de Texas, el investigador Carl Deckard y Joseph Beaman consideró la construcción de objetos físicos a partir de la adición de capas de material. Deckard y Beaman fueron capaces de producir resultados prometedores y eso le dio el galardón de la National Science Foundation con la primera beca para la fabricación estratégica. Crearon una patente (Deckard, 1989) en octubre de 1986 donde se describía el funcionamiento del aparato que integraba un láser. El láser era asistido por ordenador y de forma secuencial sinterizaba capas de polvo para construir finalmente la pieza deseada, la experimentación se realizó con un láser de 100W de fibra Nd:YAG, donde se sinterizó ABS (Beaman & Deckard, 1989). Los esfuerzos realizados son la base de la tecnología de AM los cuales han revolucionado el mundo del diseño, la fabricación y la producción de piezas.

Al mismo tiempo, un inventor independiente llamado Michel Feygin (Feygin, 1989) desarrolló una idea similar a la de Deckard, una máquina que cortaba y unía capas de papel, para su comercialización creó la empresa Helisys. En el mismo invento también incluyó el proceso donde se depositaba una capa de polvo y donde a través de un escáner láser se obtenía la sinterización del polvo.

La primera máquina comercial que se distribuyó fue una máquina de estereolitografía (Figura 1.1), conocida como *stereolithography apparatus* (SLA), por Chuck Hull, en el 1988, que fundó 3D Systems (3D Systems) para la comercialización. Esta primera máquina de SLA construye prototipos físicos a través de la solidificación de delgadas capas de resina líquida fotosensible a la irradiación de un láser ultravioletado. El láser irradia la sección del objeto, una vez se completa la capa, la plataforma desciende y la resina fluye sobre la capa anterior, de forma que, al radiarse otra vez la superficie vuelve a solidificarse y se sigue el mismo procedimiento hasta obtener la pieza. Para la utilización del proceso se requiere de un sistema de control por ordenador debido a la complejidad de los movimientos del láser.



Figura 1.1: Primer sistema de estereolitografía. Fuente: (3D Systems)

La licencia del proceso desarrollado por Beaman y Deckard (Beaman & Deckard, 1989) fue concedida a DTM, una empresa creada específicamente para su comercialización y que puso al mercado la primera máquina de sinterizar, la Sinterstation 2000, en el año 1992 (Shellabear & Nyrhila, 2004). El proceso SLS es un proceso de adición de capas como la SLA, no obstante, para crear las piezas, el material en polvo es sinterizado de forma selectiva a través del movimiento de un escáner que recibe la luz láser. Este proceso fue comercializado después por la empresa 3D Systems que compró DTM en 2001 (Shellabear & Nyrhila, 2004).

La segunda máquina que se comercializó, utilizando la sinterización directa del material, fue EOS a finales del 94 (Klocke et al., 1995). EOS adquirió todas las patentes de la empresa 3D Systems relacionadas con la sinterización por láser (Shellabear & Nyrhila, 2004).

Desde la aparición de la primera máquina SLA hasta a día de hoy, las mejoras y las investigaciones realizadas han desencadenado la aparición de diferentes técnicas, con una metodología similar al proceso de SLA, dando así la aparición de distintos procesos de AM.

Las universidades, institutos y empresas que más publicaciones y proyectos han realizado en temas relacionados en las tecnologías de AM son Loughborough University (Loughborough University, 2011; Beal et al., 2006), Birmingham University (Niu & Chang, 2000), University of Texas at Austin (Das et al., 1999; Das, 2003; Agarwala et al., 1995),

University of Bern (Fischer et al., 2003; Fischer et al., 2005), Catholic University of Leuven (Wang et al., 2002; Kruth et al., 2004), University of Liverpool (Morgan et al., 2002; Xie et al., 2005), Sharif University of Technology (Simchi & Pohl, 2003; Simchi, 2004, Simchi, 2006), Electro Optical Systems (EOS), 3D System (3D Systems), Phenix System (Phenix Systems), National Taiwan University of Science and Technology (Tang et al., 2006), Utah State University (Kumar, 2009), Huazhong University of Science and Technology (Zhang et al., 2009) entre otros.

1.3. Interés y motivación

La presente tesis se ha llevado a cabo en el marco de una de las principales líneas de investigación del *grup de recerca en enginyeria del producte, procés i producció* (GREP), grupo que forma parte de la Universitat de Girona, además, de la *associació espanyola de rapid manufacturing* (ASERM) y la *associació catalana de motlles i matrius* (ASCAMM). En las siguientes secciones se describe el interés, los proyectos, las tareas y las motivaciones personales que se han concebido para la realización de esta tesis.

El grupo de investigación GREP se fundó en el 1998 con miembros de la Universitat de Girona. Desde el inicio, el grupo ha realizado investigaciones en aspectos relacionados con la organización empresarial, los procesos de producción, el desarrollo del producto y en el diseño de máquinas. Las líneas de interés del grupo de investigación son:

- Planificación, organización y control de procesos: sistemas CAPP (*computer aided process planning*), sistemas PPC (*production planning control*) y la integración de ambos.
- Calidad: estándares de aseguramiento y gestión de la calidad total –ISO 9001- medioambiental –ISO 14001-, seguridad y salud, Lean Manufacturing, etc.
- Diseño de producto: especificaciones de productos, sistemas diseño para la fabricación (DFM), diseño para el montaje (DFA), diseño para la fabricación y el montaje (DFMA), diseño para el medio ambiente (DFE) y ecodiseño.
- Optimización de procesos y productividad: Mecanizado de alta velocidad (HSM), adición de capas (AM), electroerosión por penetración (EDM), deformación incremental de chapa (ISF), rectificado y doblado de chapa. La optimización se realiza mediante el control de la precisión dimensional y la rugosidad superficial, utilización de sensores, monitorización de los procesos, diagnóstico y control.
- Producción medioambientalmente: control, reducción y gestión del impacto medioambiental, análisis del ciclo de vida (LCA), reutilización, reciclaje y

recuperación de componentes, materiales sobrantes, viruta, excedentes y residuos del proceso productivo.

Por otro lado, en julio del 2004 se creó ASERM, el principal objetivo de esta asociación es el encuentro de distintas empresas, centros tecnológicos, centros de investigación y universidades españolas para investigar y desarrollar maquinaria propia en el campo de la tecnología aditiva. Además, ASERM debe ayudar a impulsar el uso de la tecnología en la industria nacional a través de proyectos y convenios. El GREP es uno de los miembros fundadores de la asociación.

La Universitat de Girona y la fundación ASCAMM, gracias al GREP, firmaron un acuerdo de colaboración científica, en febrero del 2006, en el campo de la investigación, formación y el uso de tecnologías innovadoras.

Conjuntamente con las distintas entidades citadas anteriormente y antes de empezar la tesis doctoral, me involucré en el grupo de investigación a través de distintos proyectos relacionados con la tecnología aditiva, abriendo una nueva línea de investigación dentro del grupo. Los proyectos en los que estuve involucrado fueron:

- Trialpro 1^{*1} – Estudio de la predicción del comportamiento final en servicio de piezas de serie, de metal o plástico, a partir de prototipos fabricados mediante técnicas de AM.
- Trialpro 2^{*2} - La investigación aplicada para la predicción de comportamiento de piezas en serie final y desarrollo y recuperación de nuevos materiales de sinterizado para AM.
- UsInTec^{*3} - Desarrollo de un proyecto de apoyo y asesoramiento tecnológico a las PYMES industriales a través del uso racional e inteligente de las tecnologías de AM como herramienta clave de su negocio y que les permita potenciar su competitividad.

A finales del 2009 se realizó una estancia de investigación de 3 meses en la Universidad del País Vasco (EHU) para trabajar con el proceso de plaqueado láser, conocido como laser cladding, otro proceso dentro de de la tecnología aditiva. La investigación fue financiada por el proyecto R²TAF^{*4}, proyecto con una plataforma para el intercambio de experiencias y conocimientos entre centros e investigadores en el ámbito de las tecnologías avanzadas de la fabricación.

Finalmente, parte de la tesis doctoral se engloba también dentro del proyecto IBERM^{*5}, cuyo objetivo es dar un impulso para conseguir lograr tecnología propia en el campo del AM, desarrollando máquinas y nuevos materiales, impulsar la industria a un avance tecnológico con la utilización de la tecnología aditiva y, crear nuevos modelos de negocio con la llegada de estos procesos.

Con el ánimo de contribuir en la abertura de una nueva línea de trabajo dentro del grupo de investigación y ampliar el conocimiento que existe actualmente en la tecnología AM, concretamente en el proceso SLS y SLM, se ha realizado este trabajo. Para poder llegar a este punto, ha sido necesario desarrollar una metodología de trabajo para estudiar la influencia de los parámetros del proceso en la formación de cordones simples. No obstante, también es interesante tener en cuenta las repercusión de la tecnología aditiva en la producción de piezas, ya sea prototipos o pieza final, y especialmente, como puede repercutir en la mejora del nivel de vida de las personas.

1.4. Objetivo de la tesis

El objetivo de la presente tesis es aumentar el conocimiento existente en la sinterización y la fundición selectiva por láser de piezas metálicas. El aumento del conocimiento se realiza mediante el análisis de los parámetros que intervienen en el proceso y basándose en el análisis de las propiedades mecánicas y geométricas del producto. Con este objetivo se pretende conseguir que el proceso de fabricación aditivo sea un proceso apto para la fabricación de piezas finales y conocer qué propiedades y cualidades no difieren de los procesos tradicionales.

El esquema de la tesis se divide en 6 capítulos, sin tener en cuenta la introducción y las referencias. El capítulo 2 ofrece una visión general del principio de funcionamiento de la tecnología aditiva, específicamente, el de creación de piezas con los procesos selectivos por láser. En el mismo capítulo, se describe los principales componentes que intervienen en el proceso (láser, materiales, parámetros de proceso y los fenómenos físicos) y se hace un estado del arte de las investigaciones realizadas básicamente en el procesamiento de materiales metálicos.

En el capítulo 3, se realiza el estudio de la afectación de los principales parámetros del proceso selectivo por láser, realizando el experimento en una máquina propia. En este capítulo se evalúan los efectos de los principales parámetros del proceso sobre las propiedades geométricas y mecánicas en el cobalto-cromo-molibdeno (CoCrMo) mediante la fundición de un cordón simple, además, se delimitan las zonas de fabricación mediante el parámetro de energía.

En los siguientes dos capítulos se analizan los comportamientos de las piezas fabricadas mediante la tecnología AM, utilizando dos tipos de procesos, el sinterizado y la fundición láser de metales. En la investigación se incluye por un lado la influencia de los parámetros en la fabricación de las piezas y, por otro de manera más experimental, se comparan las piezas fabricadas mediante la fundición selectiva por láser con los procesos tradicionales.

Para estudiar el comportamiento de los principales parámetros se trabaja con varios tipos de tecnologías comerciales, estudiando cómo actúan los distintos componentes de los distintos procesos y, sobretodo, poniendo especial énfasis en cómo afectan los parámetros en la fabricación de la pieza. En el capítulo 4 se desarrolla este objetivo realizando distintas piezas de ensayo, utilizando geometrías estándares, mientras que en el capítulo 5 se realiza con réplicas de geometrías complejas de productos reales, que permiten comparar las propiedades mecánicas del proceso de fundición selectiva por láser con los procesos tradicionales.

En el capítulo 6 se utiliza un caso real de un paciente que tiene una dolencia en la mandíbula y se utiliza como caso práctico de la fabricación aditiva para la fabricación de geometrías complejas y de un alto valor añadido. Se utiliza el proceso como herramienta en un sector innovador como el biomédico, donde además, se requiere del intercambio de información entre doctores e ingenieros.

Un último objetivo adicional consiste en que los conocimientos que se adquieran durante el trabajo permitirán desarrollar y fabricar una máquina de AM para poder investigar nuevos materiales, tener un mayor control en los parámetros y una mayor flexibilidad que las máquinas comerciales actuales. Por este motivo, la tesis lleva intrínsecamente la abertura de la nueva línea de fabricación por adición de capas del grupo de investigación.

Para conseguir el objetivo de la tesis, se plantean 4 objetivos específicos:

- *Definir una metodología para calcular la densidad de energía mínima para obtener un cordón.* Calcular la densidad de energía mínima necesaria para obtener un cordón continuo, que nos permita estudiar la influencia de los parámetros y obtener los valores óptimos para el proceso de SLM de un material en concreto.
- *Analizar la influencia de los parámetros en la formación del cordón.* Conocer cómo influyen los parámetros del proceso en la geometría, densidad y dureza del cordón obtenido mediante SLM.
- *Estudiar el efecto de los parámetros de proceso en el comportamiento mecánico de las piezas de adición de capa con geometrías estándar.* Calcular el efecto de los parámetros potencia, altura de capa y dirección de fabricación con varias propiedades mecánicas y dimensionales para cada una de los procesos utilizados.
- *Comparar el comportamiento mecánico entre piezas fabricadas con procesos convencionales y el proceso SLM.* Comparar las propiedades mecánicas de tensión, flexión y compresión de piezas convencionales con las fabricadas mediante el proceso de SLM, utilizando materiales similares.

En el último capítulo se hace un resumen y se aportan las conclusiones de todos los objetivos y conocimientos adquiridos, además de incluir los trabajos futuros que se pueden desprender de la presente tesis y poder avanzar en el aumento del conocimiento del grupo de investigación y del mundo científico.

1.5. Medios utilizados en la realización de la tesis

Los grandes equipos que se han utilizado para la realización de esta tesis son:

- DMLS M250 de la compañía EOS con material DS-H20
- DMLS M270 de la compañía EOS con material Ti6Al4V
- SLM M3Linear de la compañía Concept Laser con material CL20
- SLS Sinterization 2500 de la compañía DTM con material ST-200
- Kondia HS-1000
- Laser Rofin FLx50
- Rectificadora GER SCA-60/40
- Máquina de digitalización 3D Sidio Triple Advance
- Máquina de ensayo universal Shimadzu Autograph AG-IS
- Microscopio Carl Zeiss Jenavaert
- Microscopio de barrido Zeiss DSM 960
- MMC Mitutoyo Crystal Apex 544
- Rugosímetro Mitutoyo Surfptest SV-2000

Capítulo 2. SLM - Estado del arte

El presente capítulo describe el estado del arte de la tecnología SLS y SLM, estableciendo las principales diferencias que existen entre los dos procesos. Además se describen las principales investigaciones realizadas, sobre todo, en el proceso de SLM a partir del material, el láser o de los parámetros que intervienen en el proceso. Para poder obtener una correcta fabricación se deben tener en cuenta los parámetros que se exponen y las interacciones que existen entre ellos.

2.1 Introducción al AM

La fabricación con tecnología aditiva, comúnmente llamada AM, se caracteriza por la fabricación de piezas a partir de un modelo físico en 3D y mediante la acumulación y unión de las capas de material, se obtiene el modelo. Existen multitud de formas para clasificar cada una de las tecnologías que envuelven la fabricación aditiva, descartando así las tecnologías substractivas y de conformación.

Para hacer una clasificación de los distintos procesos se usa comúnmente el estado de la materia primera (líquido, polvo y sólido) (Chua et al., 1998) y el tipo de unión física que existe entre el material (Figura 2.1). De este modo, aparecen distintas nomenclaturas para definir los distintos procesos por aportación de material. Recientemente, la norma ASTM

F2792 (ASTM F2792, 2012) ha propuesto como definición de sistema aditivo un proceso en el cual la energía térmica funde de forma selectiva el polvo metálico encima de una plataforma. Debido a que la tecnología aditiva es relativamente nueva, las compañías han creado y patentado distintas nomenclaturas para diferenciarse entre ellos aunque todos se refieren a un mismo proceso de fabricación (Shellabear & Nyrhila, 2004).

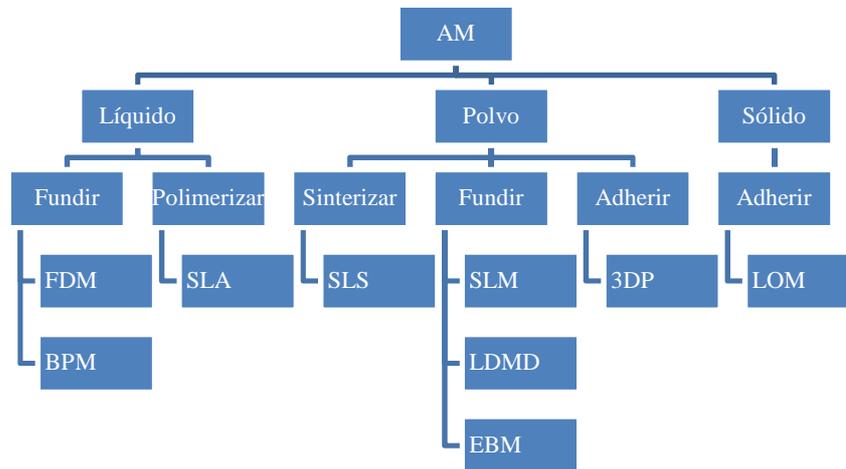


Figura 2.1: Clasificación de las tecnologías de AM según estado inicial.

Los distintos procesos permiten obtener ciertas piezas o prototipos con un bajo coste y unos grandes márgenes de beneficio porque podrían ser extremadamente caros si se produjeran con tecnologías convencionales. No obstante, las piezas producidas por estos procesos son piezas con un bajo lote o piezas únicas (Economist, 2012). Además, la tecnología AM permite realizar cambios con una gran versatilidad y rapidez, mientras que utilizando las demás tecnologías convencionales podrían demorarse días, semanas o incluso meses para obtener la pieza final (Rosochowsky & Matuszak, 2000).

Los principales procesos de fabricación aditiva surgieron a mediados de los años 90, por lo que se puede considerar que esta tecnología es relativamente nueva. Durante este poco tiempo de vida, se ha producido un incremento en las ventas y se ha empezado a confiar en los sistemas de AM como procesos de fabricación (Shellabear & Nyrhila, 2004). Este acercamiento a las tecnologías AM se puede deber al cambio de mentalidad de la sociedad que ha permitido una nueva revolución industrial con una nueva metodología de fabricación y un gran cambio en el diseño.

Dentro de las tecnologías AM podemos encontrar máquinas comerciales, entre ellas la DMLS o la EBM, bastante complejas, con gran resolución pero con un coste que puede superar los 800.000€. Este factor económico ha hecho aumentar el desarrollo y comercialización de impresoras 3D personales (Figura 2.2), como son la Fabathome o la RepRap, con coste que ronda los 1.000€. Otro de los factores que han permitido el incremento del mercado de estas impresoras personales ha sido su flexibilidad y el hecho de no requerir personal con conocimientos muy específicos para la utilización de las máquinas, permitiendo que cualquier persona pueda diseñar y fabricar sus propias piezas. Una de las

grandes ventajas de estas impresoras personales son las piezas estándar que las componen, reduciendo los costes asociados a posibles reparaciones. Además, estas impresoras utilizan un software de código abierto que permite a los usuarios expertos poder modificar y adaptar las máquinas a sus propias aplicaciones y necesidades.

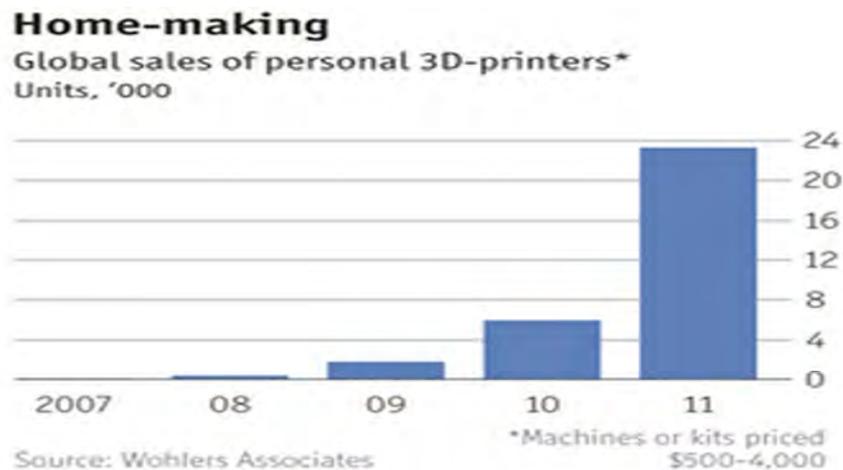


Figura 2.2: Venta de impresoras 3D personales. Fuente: (Wholers report, 2011)

Por lo que hace referencia a las máquinas comerciales, se necesitan unos conocimientos previos para poder fabricar piezas con un comportamiento específico. Esto es debido a que se requiere de una preparación antes de la fabricación, un control previo del proceso y un mantenimiento específico de la máquina. La ventaja de utilizar máquinas comerciales es que los suministradores del material son los mismos fabricantes de la máquina, y por lo tanto, los parámetros de proceso proporcionados por el fabricante aseguran la obtención de la pieza deseada. No obstante, las máquinas comerciales no permiten la utilización de materiales ajenos al fabricante ni la modificación de ciertos parámetros de proceso por parte del usuario.

En el 2010, el porcentaje de facturación de las piezas finales fabricadas por AM respecto a la totalidad de las piezas fabricadas por AM fue del 30% según las estimaciones del anuario industrial Wohlers (Wholers Report, 2011). Las predicciones son que este porcentaje aumente hasta el 50% en el 2016 y en más del 80% en el 2020, dando a entender que la tecnología se usará ampliamente para fabricación de piezas finales o que las piezas fabricadas tendrán un alto valor añadido que incrementará su coste final.

Hoy en día, la tecnología AM está concebida especialmente para realizar pequeñas producciones en el sector aeronáutico (Rochus et al., 2007), automovilístico (Tang et al., 2003) y sobretodo personalizar piezas en el sector médico (Vandenbroucke & Kruth, 2007). Con la actual metodología de fabricación capa a capa se pueden producir piezas que antes eran consideradas imposibles de fabricar, abriendo un abanico de posibilidades en el mundo del diseño.

2.1.1 Proceso básico de la construcción en AM

La tecnología AM permite a ingenieros y diseñadores concebir físicamente los proyectos y detectar los errores de producción antes del lanzamiento de la serie final. La tecnología permite además reducir el número de tareas y, en algunos casos, el coste productivo disminuyéndolo cerca del 50% (Rosochowsky & Matuszak, 2000; Hanumaiah & Ravi, 2007; Meena & Nagahanumaiah, 2006). La mayoría de los procesos AM utilizan la misma metodología de fabricación para obtener una pieza final, sobre todo si se utiliza un material metálico para sinterizar o fundir.

El proceso que se describe a continuación (Figura 2.3) es específico para los procesos de SLS y SLM aunque hay partes comunes para otros procesos de adición.

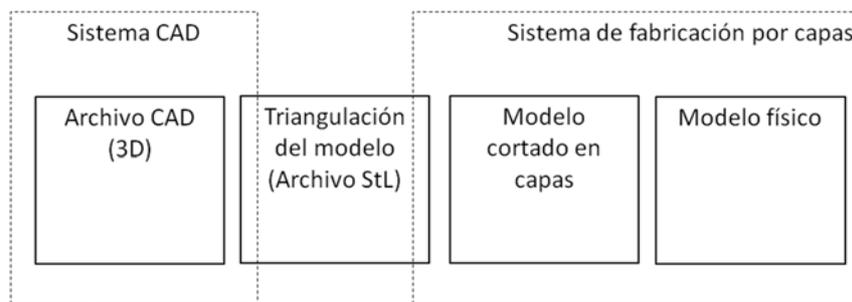


Figura 2.3: Proceso para la obtención de piezas mediante AM.

- **Modelo en 3D:**

Actualmente, la mayoría de programas CAD permiten diseñar piezas en 3D. Además la ingeniería inversa, con software específico, permite importar imágenes obtenidas a partir de una tomografía computarizada (TC), imágenes por resonancia magnética (MRI), escáneres 3D entre otros y convertirlos en modelos 3D (Rosochowsky & Matuszak, 2000). Este proceso de ingeniería inversa o bien permite la obtención de la geometría deseada, o bien permite tratar la información para poder obtener la geometría deseada. En ningún caso se puede conseguir fabricar una pieza si anteriormente no se puede representar como un objeto sólido 3D en el ordenador.

El diseño, entendido como la obtención y/o modificación de la geometría, puede representar 2/3 del coste total de la pieza debido a su posible complejidad (Rosochowsky & Matuszak, 2000). Antes de la aparición de la tecnología aditiva, el ingeniero tenía 2 desventajas, una era solucionar la problemática de los requisitos y otra era pensar cómo fabricar la pieza mientras se realizaba el diseño. Por este motivo, antes de la aparición de la tecnología AM existía la limitación del proceso de producción. Actualmente, con la aparición de la tecnología AM, los ingenieros que utilizan la tecnología deben tener en cuenta las limitaciones en los materiales y en los programas de diseño, intercambiando así, los roles que habían jugado hasta la ahora.

La mayoría de programas de diseño mecánico están pensados para poder fabricar piezas con geometrías poco complejas, es decir geometrías ortogonales (planos, cilindros, esferas, arcos y en algunos casos superficies irregulares o Nurbs). No obstante, con la aparición de la tecnología AM se pueden realizar piezas con estructuras internas, microestructuras y macroestructuras difíciles de diseñar con los programas actuales.

- Conversión del diseño 3D en StL

El modelo en 3D es importado con un formato estandarizado, denominado StL. Este formato, utilizado por todos los sistemas de AM, describe únicamente las superficies de la geometría tridimensional. El formato no representa el color, textura u otros atributos de la pieza. Para describir la geometría se utilizan superficies de triángulos planos que se definen a través de tres vértices y un vector normal a la superficie (Figura 2.4a). Los vértices son ordenados siguiendo la regla de la mano derecha y usando un sistema de coordenadas cartesiano para definir donde se encuentra el material. El formato StL describe cada uno de los triángulos generados indicando los vértices con cada una de las coordenadas y el vector normal a la superficie (Figura 2.4b).

Como todos los formatos estándares existen unas normas para evitar múltiples interpretaciones de una geometría (Figura 2.4c). Si embargo, la utilización de triángulos planos constituye un problema de precisión cuando es necesario definir un elemento curvado. En estos casos, se necesita una gran cantidad de triángulos para disminuir el error, comportando, un aumento del tamaño de los archivos. Este problema fue más significativo durante los inicios de la tecnología AM cuando las capacidades de los ordenadores eran muy limitadas y se tenía que hacer un balance entre la precisión y la capacidad de gestión de los archivos.

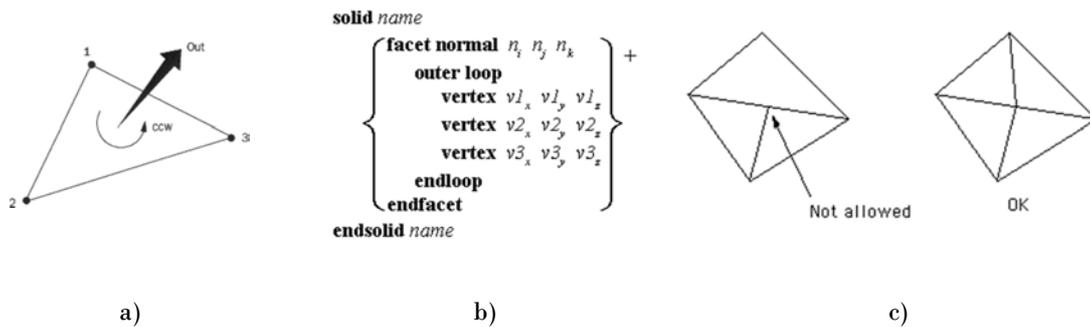


Figura 2.4: a) Definición del triángulo b) Descripción c) Normas de la triangulación

Actualmente, El comité ASTM de Additive Manufacturing está desarrollando un nuevo formato estandarizado denominado *additive manufacturing file* (AMF). Este formato pretende mejorar la fidelidad de la geometría e introducir características de las piezas, como la utilización de múltiples materiales, texturas, degradados de colores e incluso escoger una macroestructura y una microestructura interna. Una de las principales características de AMF es la utilización de un lenguaje de marcas extensible (XML). Es decir, AMF es un

formato de formatos que se puede hacer extensible en lugar de usar un lenguaje ASCII o binario, lo que permite introducir parámetros como el color, la textura, diversidad de materiales entre otros. Una de las principales ventajas de AMF es la mejora de la precisión debido a que permite curvar las líneas de los triángulos, de forma que se adapta mejor a la pieza así como, disminuir el número de triángulos necesarios.

- Transferencia a la máquina de AM

Antes de enviar el archivo StL a la máquina AM se deben realizar varias etapas, entre ellas cortes paralelos a la superficie de construcción. Para materiales metálicos normalmente, se realizan cortes de entre 20 y 50 micras (Wang et al., 2006), aunque se puede encontrar nanocapas de material con espesores de 0,7 μm . El grosor de la capa se elige dependiendo de varias variables, entre ellas el tipo de material, la precisión del sistema y de las características que se quieran obtener en la pieza (precisión, tolerancia y propiedades de la pieza final).

Durante el proceso de transferencia también es necesario crear los soportes de la pieza (Hanumaiah & Ravi, 2007). Los soportes ayudan a aguantar el peso del material durante el proceso de sinterización o fusión, ya que el propio polvo no es capaz de mantener el peso.

Previamente a la transferencia del archivo a la máquina se detallan los parámetros del proceso. En este apartado se incluyen la estrategia de fabricación, tipo de exposición, velocidad, potencia, superposición del láser, longitud del vector de escaneado, entre otros que dependen de la tecnología y del material utilizado. Todas las empresas que subministran este tipo de tecnología dan información sobre los parámetros de proceso a utilizar para asegurar la obtención eficiente de la pieza final siempre, y cuando se utilice el material que proporcionan.

La gran mayoría de máquinas AM comerciales disponen de software que permite obtener una aproximación del tiempo de construcción en función de los parámetros de fabricación, el área de la pieza y sobre todo teniendo en cuenta la altura de la pieza.

- Puesto a punto de la máquina

Aunque el proceso de AM se considera un proceso automático es necesaria preparar la máquina antes de usarla. En esta parte del proceso interviene el factor humano que debe realizar la puesta a punto. En los procesos de SLS y SLM es necesario rellenar la plataforma de aportación de material, compactarlo y nivelarlo.

Por otro lado, se debe realizar la nivelación de la plataforma de fabricación con el elemento de barrido o de repartición del polvo con el objetivo de obtener una capa de polvo constante a lo largo de toda la base. Además, es necesario definir la primera altura de capa de polvo (Delgado et al., 2009).

- **Construcción o fabricación**

Una vez se tiene a punto la máquina, el proceso de construcción sigue tres fases básicas. Inicialmente se esparce una fina capa de polvo en la superficie de construcción mediante el elemento de barrido o repartición del polvo. Una vez terminado, el láser irradia las secciones donde hay la pieza sólida, siguiendo las instrucciones geométrica que proporciona el archivo StL. Cuando ha terminado de irradiar todas las secciones, la plataforma de construcción desciende generando espacio a rellenar con la siguiente capa de polvo. El proceso se repite hasta conseguir toda la pieza (Hanumaiah & Ravi, 2007).

- **Extracción de la pieza, limpieza y post proceso**

Una vez se ha terminado la construcción de la pieza es necesario retirarla, por lo tanto, es necesario separar la pieza de la base de construcción si no se utiliza la base como parte de la pieza. Normalmente el proceso de separación se realiza mediante la electroerosión por hilo o bien mecanizando parte de la plataforma. Además, si se precisa de soportes, es necesario eliminarlos. El proceso de eliminación de soportes en los materiales metálicos se realiza normalmente de forma manual y requiere de ciertas habilidades.

Asimismo, como ocurre con las tecnologías convencionales, se pueden procesar la pieza una vez fabricada para obtener las propiedades finales deseadas. Operaciones de mecanizado, roscado y trepado que permiten disminuir las tolerancias y mejorar el acabado superficial (Rosochowsky & Matuszak, 2000). Existen otros procesos como el pulido (Rosochowsky & Matuszak, 2000, Panjan et al., 2005) y el rectificado (Panjan et al., 2005) que permiten obtener superficies más lisas. Existen otros procesos que además de mejorar el acabado superficial también mejoran las propiedades mecánicas de la pieza final. Es el caso de la galvanoplastia (Tay & Haider, 2002), el impacto de perdigones (Panjan et al., 2005) o la utilización de recubrimientos (Panjan et al., 2005; Gibson & Shi, 1997).

Si se utiliza la sinterización para fabricar piezas poliméricas, se puede realizar el post proceso de infiltración para aumentar su resistencia. Este proceso se realiza incrementando la temperatura por encima del punto de transición vítrea del polímero y substituyéndolo por otro material que es infiltrado. Una vez realizada la infiltración se pueden realizar los mismos post-procesos descritos anteriormente.

2.2 Diferencia entre SLS y SLM

La sinterización selectiva por láser (SLS) y la fusión selectiva por láser (SLM) son dos mecanismos de fabricación aditiva utilizados para procesar metales (Yang et al. 2010). La SLS y la SLM se basan en una capa de partículas de polvo depositada en una plataforma

de construcción que, a través de un láser, se sinteriza o funde a partir de la aplicación de la energía necesaria mediante un láser.

La sinterización o la fundición se caracterizan principalmente por el estado (sólido o líquido respectivamente) en que llegan las partículas de material después de aplicar la fuente de energía láser. Durante el proceso de sinterización y fundición ocurren varios fenómenos físicos, químicos y térmicos donde se incluyen, entre otros, la absorción de la energía del láser en la superficie del polvo, la transferencia calorífica, la modificación del estado de las partículas de material, la unión de las partículas, la interacción con la atmósfera y un enfriamiento repentino.

Como se ha comentado anteriormente, la gran diferencia que existe entre estas dos tecnologías es el estado, parcial o total, en que llega el material. Si se realiza una clasificación de los materiales en función de sus estados encontramos distintas categorías. En primer lugar, la sinterización por estado sólido, donde el material se reblandece y las partículas se unen entre sí; en segundo lugar, se encuentra la sinterización por estado líquido, también conocida como fundición parcial, donde parte de las partículas son fundidas y finalmente, la fundición completa donde todas las partículas de polvo pasan a un estado líquido durante el proceso (Rombous, 2006).

La sinterización por estado sólido ocurre mediante la unión de partículas sólidas (Figura 2.5). Esta unión se realiza a través de la difusión de los átomos a lo largo de la superficie del grano de polvo cuando está en contacto con otro grano, creando así, un cuello entre las dos partículas. Para que ocurra la unión se deben calentar las partículas (Agarwala et al., 1995) en un rango que va desde la mitad de la temperatura de fundición hasta un punto próximo a esta temperatura, con la condición de que nunca llegue a superarlo. Este tipo de proceso es muy lento debido a que la difusión de las partículas se alcanza en un período relativamente largo comparado con otros tipos de procesos.

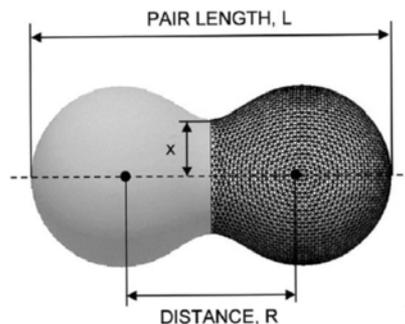


Figura 2.5: Sinterización mediante la difusión de partículas.

La sinterización parcial o la fundición parcial es un proceso donde parte del material es fundido a través de la acción de un láser. Este mecanismo de fabricación, comparado con el explicado anteriormente, es más rápido debido a que solamente se funde parte del material y a que el tiempo de interacción del láser es más corto. A partir de que se obtiene un campo

de baño fundido, parte de las partículas están en estado líquido, lo que provoca que penetren en los espacios vacíos. Finalmente se enfría todo rápidamente para provocar la solidificación (Agarwala et al., 1995). Este proceso de unión se realiza mediante la fuerza de capilaridad, que viene determinada por el material utilizado, sin embargo, la velocidad de reacción del material viene determinada por la transformación del estado de sólido a líquido (Porter & Easterling, 2009).

En el caso de la sinterización parcial se necesita que el material en cuestión tenga más de un componente. La fundición se realiza con uno o más componentes. El que tiene un menor punto de fundición se derrite, mientras que siempre queda un componente que no sufre ningún cambio de estado. El material fundido es denominado aglutinante mientras que el resto se conoce como material estructural.

En el proceso de sinterización parcial influyen principalmente la capilaridad y la tensión superficial del material, los cuales determinan que el proceso de sinterización sea satisfactorio (Agarwala et al., 1995). Por lo tanto, se debe tener un buen control de la viscosidad del material y del ratio de partículas sólidas/líquidas. En los procesos que intervienen dos tipos de materiales muy distintos, como pueden ser los materiales poliméricos (aglutinante) y los materiales metálicos (estructural), el proceso de sinterización dependerá sobretodo de las propiedades del polímero, debido a su punto bajo de fusión (Gibson & Shi, 1997).

El proceso de la fundición completo mediante láser, conocido habitualmente como SLM, es un proceso donde todas las partículas pasan de un estado sólido a un estado líquido en un período muy corto de tiempo. El proceso SLM es un poco más lento que el anterior y más difícil de controlar debido a problemas de tensiones térmicas que aparecen una vez se enfría la pieza y, también, por el llamado efecto bola (Kruth et al., 2004). Las propiedades mecánicas que se obtienen utilizando este proceso son parecidas a las obtenidas mediante el proceso de forjado o de fundición tradicional.

Aunque la línea que divide los procesos de sinterización parcial y la fundición completa está muy bien definida en términos conceptuales, en la experimentación, es muy ambigua (Merzelis & Kruth, 2006).

En la Figura 2.6 se muestra un esquema de varios procesos de adición de capas que utilizan material metálico y la acción del láser para modificar su estado físico.

Las principales diferencias que existen entre los distintos procesos son el estado en que llegan las partículas y como se suministra el material. El material se puede suministrar o bien, depositándolo en la plataforma de construcción (SLS, micro-sintering y SLM), o bien inyectándolo a través de unos conductos hasta unos cabezales láseres especiales que focalizan el polvo en un punto donde incide el láser (laser cladding).

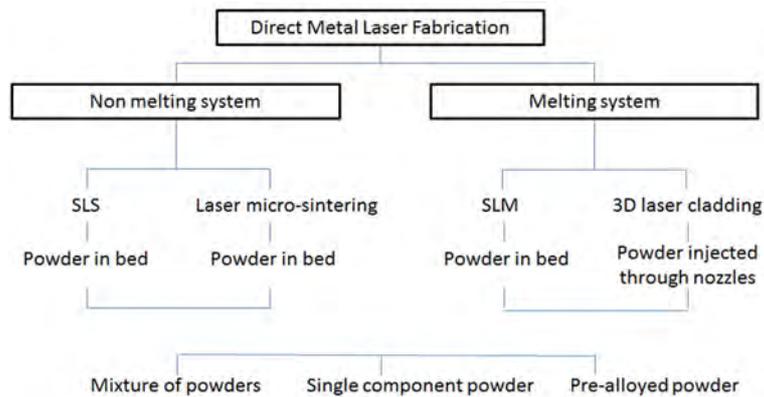


Figura 2.6: Procesos de AM con la fabricación de metales. Fuente: (Santos et al., 2006)

2.3 Parámetros

Los parámetros del proceso son las distintas variables que intervienen en el proceso, en este caso, en la sinterización o fundición, y que sirven para identificarlas y cuantificarlas. Aunque en el proceso de fabricación intervienen muchas variables, solo algunas son importantes en la afectación de las propiedades finales de la pieza, por este motivo, es importante conocer la relación que existe entre los distintos parámetros.

Las variables vienen definidas por los parámetros del láser, del material y del propio proceso y, sobre todo, por la relación o influencia que tienen entre ellos (Figura 2.7). Actualmente, aunque la tecnología es utilizada en varios campos de aplicación, existe un desconocimiento de algunos parámetros de proceso debido al gran número de variables implicadas. Sin embargo, muchas de las investigaciones desarrolladas actualmente servirán para ayudar a comprender el proceso de SLM en su conjunto global (Yadroitsev & Smurov, 2010).

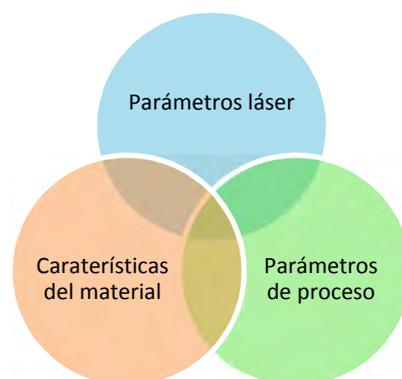


Figura 2.7: Elementos que intervienen en el proceso SLS y SLM

El proceso de SLM se define por un gran número de parámetros, donde se pueden enumerar fácilmente más de 50 (Van Elsen et al., 2008). Además muchos de ellos se relacionan entre sí generando subprocesos como la absorción y la dispersión de la radiación láser, la transferencia térmica, la transformación de fases, el intercambio térmico entre las partículas sólidas y líquidas, la geometría del baño de fusión, el gradiente de tensión superficial, la evaporación, la emisión de material y las reacciones químicas entre otros (Van Elsen et al., 2008; Yadroitsev & Smurov, 2010). Esto hace que determinar el comportamiento final del proceso sea aún muy complicado.

Existen diferentes maneras de clasificar los parámetros que intervienen en el proceso SLM. En este trabajo se ha realizado una clasificación de los parámetros en función de las tres variables más importantes de los procesos SLS y SLM: el láser, el material y los parámetros de proceso. Cuando se realiza este tipo de clasificación la dificultad recae en la explicación y estudio de la influencia de los subprocesos, ya que en muchos casos intervienen parámetros de las tres variables.

Aunque se confirma que existe una gran multitud de parámetros, autores como Childs et al., (Childs et al., 2004) y Rombouts (Rombouts, 2006) aseguran que solo una pequeña cantidad de estos parámetros (Figura 2.8) influyen en las propiedades finales de la pieza creada mediante el proceso de SLS y SLM. Según ellos, los parámetros más importantes son: la potencia del láser, la longitud de onda, el diámetro del haz, la velocidad de escaneo, el grosor de la capa y las propias propiedades del polvo.

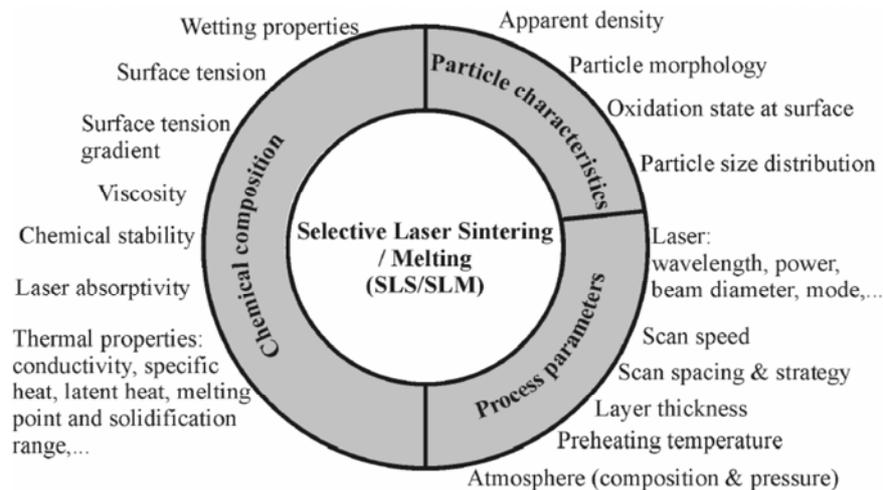


Figura 2.8: Parámetros que afectan en SLS y SLM. Fuente: (Rombouts, 2006).

Actualmente, las tecnologías SLS y SLM solo permiten fabricar piezas totalmente densas, sin la utilización de post-procesos y con un rango de materiales muy limitado. Para ampliar este rango de materiales es necesario entender y conocer cómo se ve afectado el proceso por los parámetros. Sin embargo, aparte de los parámetros, el proceso transcurre en

un tiempo muy corto, del orden de milisegundos, de forma que es muy complejo estudiarlo (Rombouts, 2006).

Centrándose en los parámetros del material se ha encontrado que estos influyen en el resultado del proceso. Los parámetros más importantes son: la propia composición química, las propiedades térmicas, ópticas, metalúrgicas y la dimensión del grano (Kruth et al., 2005).

Uno de los problemas de los procesos aditivos según Gibson (Gibson & Shi, 1997) es que no se puede conseguir maximizar la calidad de la pieza ni sus propiedades mecánicas utilizando los mismos parámetros de fabricación, no obstante, se pueden mejorar otros parámetros utilizando algún post-proceso. Por este motivo, se deben escoger correctamente los parámetros del proceso y las características del material para así poder desarrollar piezas con unas propiedades aceptables de densidad, porosidad, homogenización de capas, con una microestructura coherente y homogénea, y disminuyendo las tensiones térmicas (Ghany & Moustafa, 2006).

Además de los parámetros del propio proceso, también interviene otros parámetros que muchas veces no se tienen en cuenta debido a que las máquinas están calibradas. De todas maneras, las máquinas no son autónomas y es importante tener en cuenta el factor humano (Khaing et al., 2001; Williams & Deckard, 1998). En este tipo de proceso, el factor humano no se ve involucrado al escoger los parámetros del proceso que vienen definidos por las propias empresas, sino que interviene en la preparación para la fabricación. Durante la preparación es necesario, normalmente, nivelar la placa donde se fabrica la pieza así como, hacer la referencia de la altura ya que esta afecta sobre todo en la repartición de la primera capa de polvo y es vital para una buena fabricación [Delgado et al. 2012].

2.4 Láser

Láser, acrónimo inglés de *light amplification by stimulated emission of radiation*, es un elemento que emite luz con 3 características principales, la luz es monocromática, coherente y direccional. Estas peculiaridades hacen que se pueda diferenciar de otras fuentes de luz como las lámparas. La luz láser tiene una longitud de onda específica de luz (un color específico) y cada fotón se mueve en sintonía con los demás. Esto significa que todos los fotones tienen frentes de onda idénticos y que, además, esta luz está concentrada en una área muy pequeña (Gould, 1959).

Para obtener un fotón es necesario estimular los electrones del átomo (Figura 2.9). Normalmente la estimulación se realiza mediante una lámpara flash, la cual bombea energía y hace que los electrones se desplacen hacia órbitas superiores. Al moverse a órbitas más

inestables los electrones puede bajar inesperadamente a órbitas más estables liberando energía en forma de fotones. El fotón tiene una cierta longitud de onda que depende de la diferencia de energía entre el estado excitado y el estado fundamental. Además, este fotón puede estimular otro electrón, el cual vibrará con la misma frecuencia y dirección que el fotón que lo estimula. Cuando este proceso se genera de forma masiva, se obtiene un grupo de fotones con la misma longitud de onda. Se utilizan dos espejos, uno con una reflexión del 100% y otro del 99%, para alinear los fotones dentro del resonador óptico y provocar la salida de algunos en forma de luz láser.



Figura 2.9: Proceso de obtención del haz láser.

Durante mucho tiempo, el láser utilizado en el proceso de SLS y SLM fue de CO_2 . Este es el mismo láser estándar utilizado en los procesos de corte por láser y de soldadura. A inicios de siglo, a pesar de la mejora en la precisión, la calidad de los materiales y el desarrollo del proceso, la calidad de los láseres seguía siendo un factor que limitaba el proceso. Por ello, se empezaron a desarrollar nuevos láseres con mejor calidad, entre ellos el láser de fibra.

Actualmente solo existen 5 grandes compañías que fabrican máquinas de SLM para usar con materiales metálicos EOS GmbH, 3D Systems, Concept Laser, MTT (adquirida por Renishaw) y Phenix (Kumar & Pityana, 2011). Por ello la variedad de los láseres utilizados no es muy grande (Tabla 2.1).

Como se puede observar, actualmente todos los láseres que se utilizan en el proceso de SLM son de fibra, esto es debido a que la mayoría de materiales metálicos tienen un alto porcentaje de absorción de energía generada con estos tipos de láseres. Por el contrario, los materiales poliméricos tienen una mejor absorción a la longitud de onda de los láseres de CO_2 . Normalmente, las compañías fabrican distintos modelos de máquina según las

dimensiones máximas de construcción y según los materiales a fundir, por este motivo, recomiendan varias potencias de láseres.

Compañía	Tecnología	Tipo de láser	Potencia [W]
EOS	SLM	Fibra	200, 400
3D System	SLM	Fibra	100, 200, 400
Concept	SLM	Fibra	200
MTT	SLM	Fibra	100, 200, 400
Phenix	SLM	Fibra	100

Tabla 2.1: Tipo y potencia de láseres utilizados en SLM. Fuente: (Kumar & Pityana, 2011).

2.4.1 Tipos de láser en AM

En la actualidad, existe una multitud de láseres que se usan para distintas aplicaciones, desde los lectores de CD hasta láseres para la industria armamentística. Esto significa que existe una gran variedad de láseres y cada uno tiene aplicaciones concretas debido a las propiedades específicas del propio láser.

Uno de los parámetros más importantes que afectan el buen procesamiento del material es la longitud de onda del láser. Cada uno de los materiales que existen en el mercado absorbe la luz más eficientemente, dependiendo de la vibración interna de los electrones, de un sitio concreto del espectro electromagnético. Por lo tanto, la longitud de onda es una variable muy importante para tener una buena absorción de la energía por parte del material (Figura 2.10).

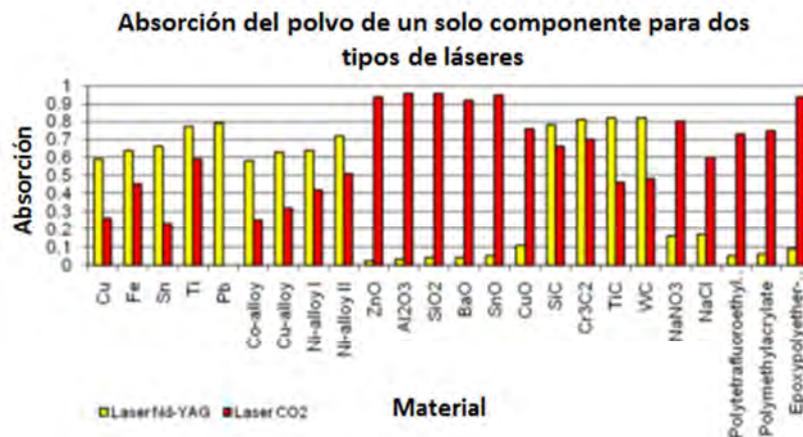


Figura 2.10: Absorción de la energía láser según los materiales. Fuente: (Tolochko et al., 2000)

El láser infrarrojo tiene una longitud de onda larga y muy cercana a los niveles de vibración de algunos materiales. Cuando estos absorben la energía se produce una rápida vibración del material y finalmente genera un calentamiento del material que induce a la fusión o incluso a la evaporación. El láser ultravioleta tienen una longitud de onda más corta pero los fotones que genera tienen más energía. Esto provoca que los fotones que se generan tengan suficiente energía como para romper la unión entre átomos consiguiendo, la sublimación del material por medio de la formación de plasma (Pham et al., 2004).

Los láseres de fibra, como el Nd:YAG y el Nd:Yb, tienen una longitud de onda menor que la de CO₂ (Tabla 2.2). Sin embargo, la longitud de onda de los láseres de fibra es absorbida mejor para los materiales metálicos que la de los de CO₂. La gran absorbancia de estos láseres hace que se pueda aumentar la velocidad de escaneo (Shellabear & Nyrhila, 2004) y, por lo tanto, el ratio de volumen fundido por unidad de tiempo.

Tipo de láser	Longitud de onda [nm]
Nd:YAG	1064
Nd:Yb	1080
CO ₂	10600

Tabla 2.2: Longitud de onda de los láseres utilizados en SLM

2.4.2 Componentes

La mayoría de láseres están formados por 5 partes o elementos que son necesarios para generar una luz láser: el medio activo, la energía de bombeo, el espejo 100% reflectante, el espejo 99% reflectante y el propio haz láser (Figura 2.11).

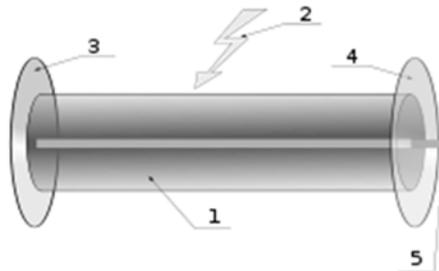


Figura 2.11: Longitud de onda de los láseres utilizados en SLM

El medio activo (1) normalmente es un gas o un cristal dopado, localizado dentro de una cavidad óptica altamente reflectante. Un medio externo (2) suministra la energía (2) para que el medio activo se estimule (la longitud de onda depende del medio activo). El medio externo que suministra la energía necesaria para estimular el medio activo normalmente es una lámpara flash y actúa como si fuere una corriente eléctrica que estimulara el medio activo. Los espejos reflectantes (3) hacen que los fotones vayan atravesando el medio activo de modo que aumenta la potencia y se va amplificando repetidamente. Parte de la luz que recibe el espejo 99% reflectante (4) pasa a través de él generando un haz de luz (5). Esta luz es dirigida, a través de espejos o a través de una fibra óptica, hasta al lugar de trabajo según si se utiliza un láser de CO₂ o de fibra respectivamente.

2.4.3 Características del haz

Las características del haz láser generado son básicamente: el tipo de onda que se consigue, el diámetro mínimo, la calidad del haz, la intensidad, la potencia y la distribución de la energía que influye en el proceso de AM. Estas características dependen de la calidad de fabricación del láser, el modo de obtención del haz y de los distintos elementos que integran el láser, entre otros parámetros.

2.4.3.1 Tipo de onda

El tipo de onda, continua o pulsada, es el modo en que el haz láser llega a la superficie. Para conseguir una onda continua, el láser bombea continuamente emitiendo permanentemente luz. Con este tipo de onda, el láser subministra la energía constantemente a lo largo del tiempo. Se considera una onda continua cuando el láser es capaz de emitir una radiación continuamente y el tiempo es igual o superior a 0,25 segundos (Shiomi et al., 1999).

Si el tiempo de radiación continua es inferior a los 0,25 segundos, el láser es considerado de onda pulsada, de forma que la emisión del haz láser se realiza por pulsos, dando una energía que no es considerada constante en el tiempo. Los láseres pulsados tienen dos estados, el pulso de trabajo y el pulso de pausa o inactivo, de este modo, depositan una cantidad de energía muy elevada en un corto periodo de tiempo, consiguiendo la ablación del material (Shiomi et al., 1999).

En los procesos de SLS y SLM se utiliza normalmente el tipo de onda continua. Si se utilizara una onda pulsada se obtendrían secciones sinterizadas o fundidas pero no unidas entre ellas debido al tiempo de inactividad del láser (Shiomi et al., 1999).

2.4.3.2 Focalización y dimensión del haz láser

En la Figura 2.12 se muestra un esquema del funcionamiento del proceso de focalización del haz láser. El haz láser llega a través de una fibra óptica (Nd:YAG) o bien a través de espejos (CO₂), al lugar de trabajo. Una vez allí, la luz es colimada con una lente de forma que la luz queda paralela, es decir, la luz es enfocada al infinito. Una vez colimada, la luz es enviada a una lente de focalización, provocando su concentración a una distancia concreta (punto de focalización) de la lente.

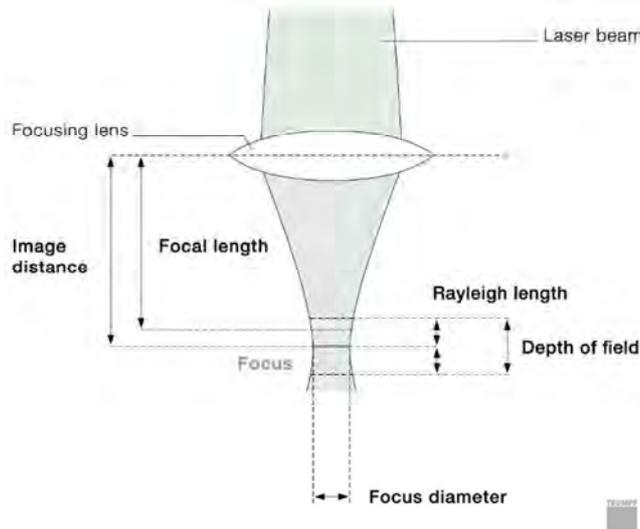
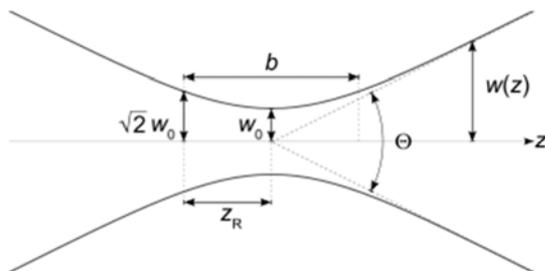


Figura 2.12: Proceso de focalización del haz. Fuente: (Trumpf)

El diámetro mínimo se encuentra en la focalización de la lente, donde se obtiene la mínima sección del haz láser (w_0) (Figura 2.13). Aun así, existe un rango de trabajo conocido como campo de Rayleigh (Ecuación 2.1). Según este campo Rayleigh, el campo de trabajo está delimitado cuando la sección del haz es el doble de la sección mínima. Es posible calcular el radio del haz láser a partir de la altura que le separa del foco (Ecuación 2.2) (ISO 11145, 2008).



$$Z_R = \frac{\pi \cdot r_0^2}{\lambda} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$r(z) = r_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Figura 2.13: Distribución en función del punto de focalización del haz. Fuente: (Trumpf)

La focalización de un haz laser es la distancia donde se encuentra el punto más pequeño del haz, en el plano perpendicular, respecto a la lente de focalización. Por lo tanto,

es donde se tiene menor área por la misma cantidad de potencia (Figura 2.14). Si se observa la sección del haz láser a lo largo de distintas secciones, podemos observar que el diámetro del haz aumenta y por lo tanto, se tiene una mayor área por la misma cantidad de potencia.

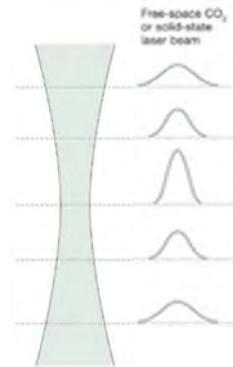


Figura 2.14: Distribución en función de la posición del haz. Fuente: (Trumpf)

Williams et al. (Williams & Deckard, 1998) estudiaron el efecto del tamaño del haz en la densidad del material manteniendo constante la densidad de energía. El estudio fue realizado experimentalmente y con simulaciones. Los resultados que se obtuvieron fueron que el aumento del tamaño del haz resultó en un aumento de la densidad (Figura 2.15a) y en la disminución del gradiente térmico (Figura 2.15b) entre la superficie del cordón y la base de construcción. La distribución de la intensidad de energía en la capa de polvo es distinta según la focalización, este fenómeno hace que la intensidad de la energía en el proceso sea más uniforme y que no exista una concentración en el centro del haz.

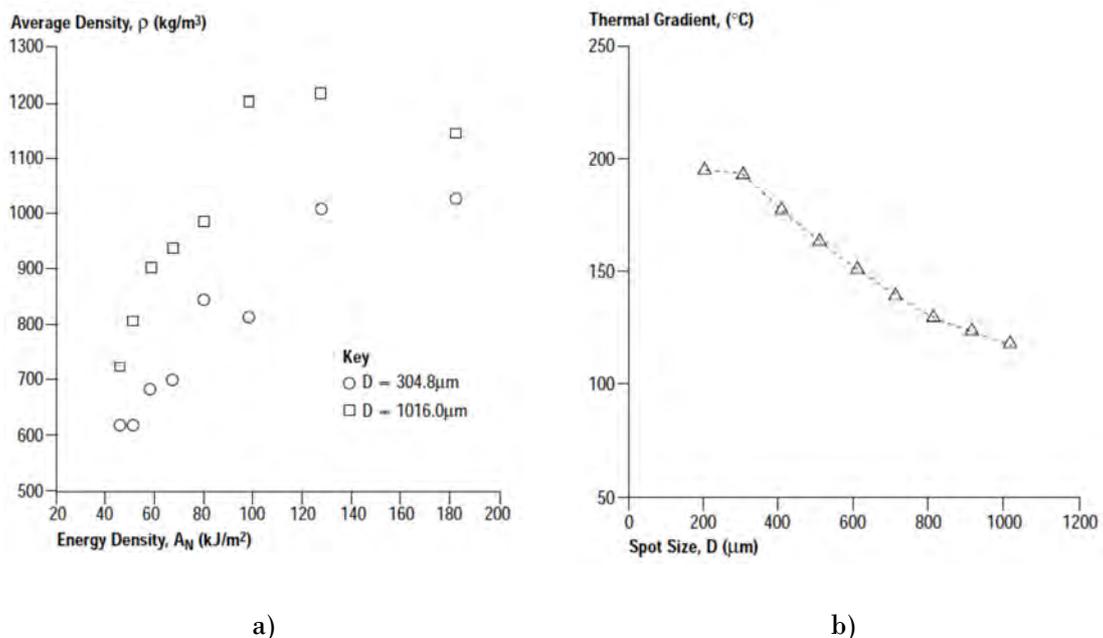


Figura 2.15: Experimentación a) densidad del material en función del diámetro del haz b) gradiente térmico entre la superficie y la base. Fuente: (Williams & Deckard, 1998)

2.4.3.3 Calidad del láser

La calidad del haz (M^2) es la medida de la cercanía del producto característico del haz al límite de difracción de un haz gaussiano perfecto (ISO 11145, 2008).

La calidad del haz de un láser, también llamado razón de propagación del haz, es una propiedad del sistema láser y es una medida común para determinar la difracción del haz. Teóricamente, el diámetro mínimo del haz es función de la calidad del haz y de la calidad de las ópticas utilizadas (Van Elsen et al., 2008).

La mejor calidad de un haz se define mediante el valor 1, esto significa que el láser sigue una distribución de energía con un haz gaussiano perfecto. Este valor está estrechamente abordado por muchos láseres, en particular por los láseres de estado sólido, los láseres de fibra y por algunos láseres de diodos de baja potencia. Los láseres de alta potencia tienen una calidad imperfecta debido a las distorsiones en la amplificación.

Para analizar la calidad del haz de un láser, se debe verificar en distintas posiciones cual es la energía, estos planos deben ser perpendiculares al haz láser. En cada uno de los planos es necesario evaluar la distribución de energía y la geometría del haz, evaluando la difracción o desviaciones de forma. Las desviaciones se clasifican según las difracciones en los ejes (Figura 2.16).

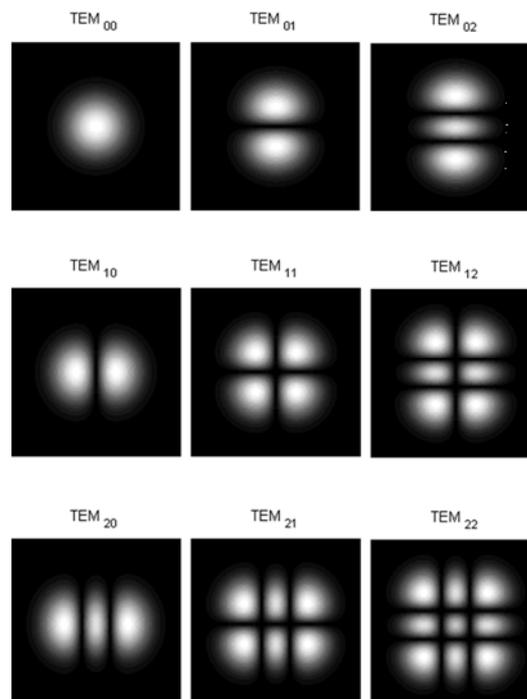


Figura 2.16: Tipos de modos transversales TEM_{mn}

Para conseguir un enfoque muy preciso y con una buena distribución de energía es necesario una alta calidad del haz láser. Los procesos que requieren de esta calidad son, entre otros, los procesos aditivos, marcado, corte o perforación. En cambio, para los procesos que

no necesitan tanta precisión porque la zona que afecta el láser no está muy limitada, como la soldaduras o los tratamientos térmicos, la calidad del láser no es importante (Van Elsen et al., 2008).

2.4.3.4 Potencia, densidad e intensidad

Los láseres, además de estar caracterizados por el tipo y la longitud de onda, también se caracterizan por la potencia. La potencia es la relación de energía que sale del haz láser por unidad de tiempo, es decir, la cantidad de energía absorbida por un material, con una absorción total en un tiempo determinado.

Para láseres de onda continua hablamos de distribución de la densidad de potencia del haz láser, en cambio, para láseres de onda pulsante hablamos de distribución de energía. En ambos casos se habla de la energía que suministra el láser.

La densidad de potencia es físicamente equivalente a la irradiancia. Ambas se miden en vatios por unidad de área. La densidad de potencia se usa generalmente para describir la distribución de la radiación dentro de un haz (Figura 2.17), mientras que la irradiancia se usa generalmente para describir la distribución de la radiación incidente sobre una superficie (UNE 11146-1).

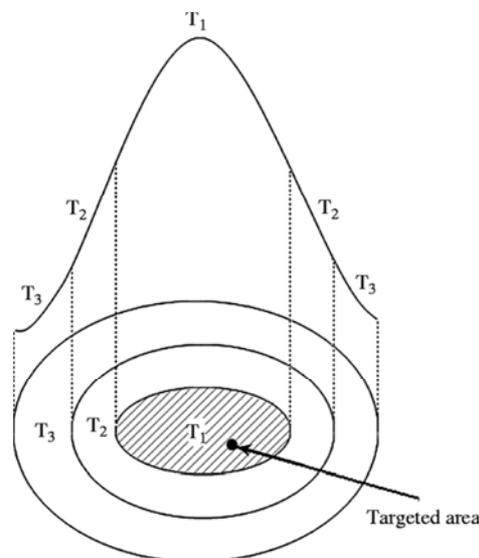


Figura 2.17: Distribución de la potencia siguiendo la campana de Gauss.

La densidad de energía está únicamente relacionada con la potencia (Ecuación 2.3) (Williams & Deckard, 1998) que suministra el propio láser y el área de abastamiento del haz. Como se ha observado en apartados anteriores, se puede observar que esta área puede ser modificada en función de la altura donde se trabaja.

$$P_L = \int_0^r I(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr$$

Ecuación 2.3

Cuando la densidad de energía es baja, las piezas fabricadas tienen una estructura interna con poros largos, típico del proceso de sinterización. A medida que se aumenta la densidad de energía, el proceso pasa a ser cada vez más parecido al de fundición, implicando la obtención de piezas con una mayor densidad. Existe un momento en que conviven los dos tipos de procesos, por lo que se obtiene la combinación de ambos procesos y se obtienen distintas densidades del material, es decir, una parte densa y otra parte con porosidad (Tolochko et al., 2003).

Existe un pico óptimo de la potencia láser para cada uno de los tipos de polvos metálicos (Shiomi et al., 1999). El pico de potencia depende de la longitud de onda y el tiempo de duración del pulso que necesita para llegar a la temperatura de fundición. Obviamente, el pico de potencia apropiado no es el máximo que puede suministrar el láser, ya que este puede llegar a temperatura donde el material se evapore (Figura 2.18). Si el material se evapora perjudica el proceso de fabricación debido a que se pierde parte del material en forma de gas, se ensucia la atmósfera y se consume una energía innecesaria que no recae en la mejora del proceso.

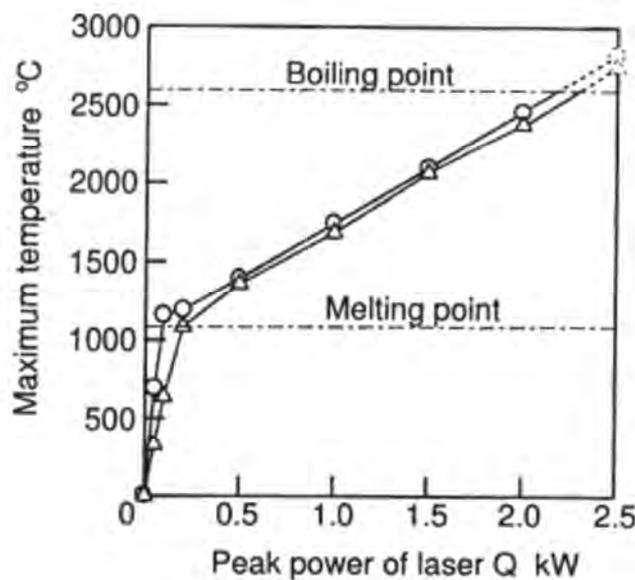


Figura 2.18: Simulación de la relación entre la temperatura y la potencia para distintos tiempos de pulsos (O = 10 ms y Δ = 5 ms). Fuente: (Shiomi et al., 1999).

La relación entre la temperatura máxima a la que llega el polvo y la duración del pulso láser se muestra en la Figura 2.19. Como se puede observar, la temperatura va creciendo en función de la duración del pulso hasta que se estabiliza, por lo tanto, se puede decir que la potencia tiene una mayor influencia en la temperatura del polvo que no la propia duración de la radiación del láser (Shiomi et al., 1999).

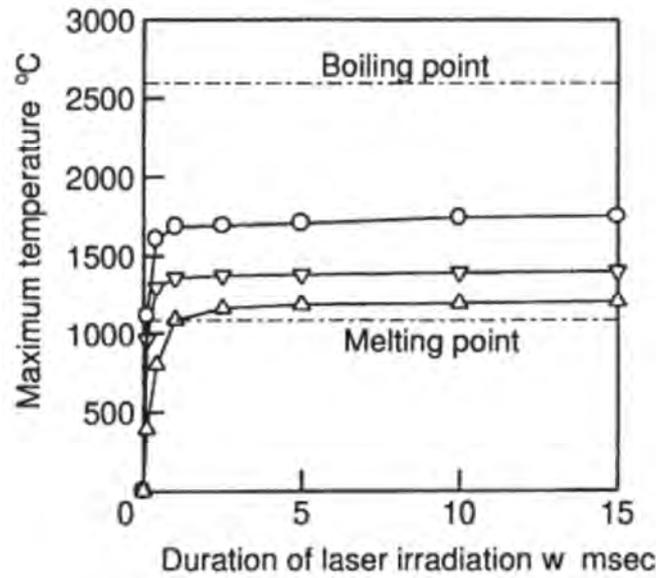


Figura 2.19: Simulación de la relación entre la temperatura y el tiempo de pulso para distintas potencias (O=1 kW, ∇ =0,5 kW y Δ=0,2 kW). Fuente: (Shiomi et al., 1999).

Según Gibson (Gibson & Shi, 1997) una correcta aproximación para saber la potencia necesaria para obtener la fundición del material se encuentra mediante la Ecuación 2.4:

$$P_n = \frac{SS \cdot \rho \cdot \phi_i \cdot LT \cdot [C_p \cdot (T_m - T_b) + I_f]}{(1 - R)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

No obstante, la intensidad de energía que absorbe el polvo (Ecuación 2.5) es un factor más importante que la propia potencia. La intensidad de energía tiene en cuenta la potencia, el área en que se distribuye y la absorción del material (es función de la longitud de onda del láser y de la temperatura). Por este motivo, es más interesante saber a partir de qué intensidad de energía se empieza a producir la fundición del polvo, aunque, la dificultad recae en saber la absorción del material (Van Elsen et al., 2008).

$$I = \frac{A \cdot P_L}{\pi \cdot \phi_i^2} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

2.5 Parámetros de proceso

La operación esencial en el proceso de SLM es la fundición del material metálico en forma de polvo que se ha depositado previamente en una superficie. Con la ayuda de un láser se realiza la fundición del polvo de forma controlada. Seguidamente, el polvo fundido se adhiere en la capa previamente fundida anterior. Debido a que el diámetro del haz del láser

es pequeño, es necesario realizar varias pasadas del láser para rellenar toda la sección de la pieza provocando la formación de una masa de baño fundido que rápidamente se solidifica cuando el láser deja de incidir. Una vez se termina la fundición de toda la sección, se reparte otra capa de polvo y vuelve a empezar el proceso (Figura 2.20).

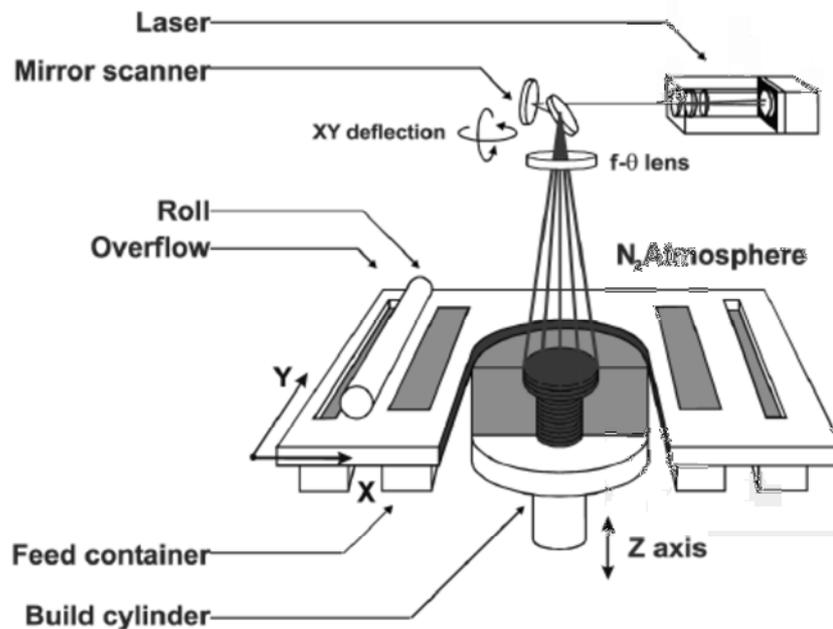


Figura 2.20: Partes y funcionamiento del proceso de SLM. Fuente: (Kruth et al., 2005)

Aunque el proceso es conceptualmente muy fácil de comprender, la gran multitud de parámetros que intervienen e influyen hace que sea un proceso muy complejo y difícil de estudiar. La influencia de los parámetros afecta al resultado de la capa de polvo y, por lo tanto, también afectan al resultado final de la pieza.

Los parámetros de proceso que tienen una mayor influencia en el proceso son la velocidad de escaneo, la altura de la capa de polvo, la estrategia del láser, la orientación de las probetas y un ambiente inerte.

Si durante el proceso de SLM los parámetros utilizados son los correctos se obtiene un baño fundido que al solidificarse, debido al efecto de la tensión superficial del material, se transforma en un segmento cilindro circular. Si por el contrario, los parámetros no son los adecuados, pueden acontecer tres comportamientos (Yadroitsev & Smurov, 2010):

- 1) Únicamente se calienta el material, esto significa que no existe unión entre partículas y tampoco entre partículas y la capa previamente fundida.
- 2) El cilindro se va rompiendo en bolas: inestabilidad del cordón llamada efecto bola, el cual provoca que no se cree un cordón estable.
- 3) El material se evapora debido a un exceso de temperatura.

2.5.1 Velocidad de escaneo (SS)

La velocidad de escaneo es la velocidad en que se mueve el haz láser sobre la superficie de trabajo. En las tecnologías comerciales, el movimiento del haz del láser se realiza mediante unos espejos galvanométricos de gran precisión que son colocados en el centro de la plataforma de construcción. Para evitar que exista una modificación del diámetro del haz en los extremos de la plataforma, el focalizador se mueve para corregir la variación del haz teniendo en cuenta la posición donde se está enfocando.

Para poner de manifiesto la influencia de la velocidad de escaneo en las condiciones de fundición durante el proceso de SLM, varios autores han realizado distintas experimentaciones analizando la influencia de la velocidad de escaneo con propiedades geométricas (Li et al., 2009; Yadroitsev & Smurov, 2010; Yadroitsev et al., 2013). Durante la experimentación se utiliza un material y se modifica la velocidad de escaneo para observar cómo varía la dimensión de la piscina fundida (Figura 2.21). Los resultados muestran que a mayores velocidades de escaneo la piscina fundida disminuye debido a que el láser tiene menos tiempo de acción sobre el material. Además, se puede observar que el camino de material fundido que provoca el láser es menos profundo a medida que aumenta la velocidad. Asimismo, el ángulo de contacto cada vez va disminuyendo, es decir, el material tiene una capacidad de mojabilidad inferior.

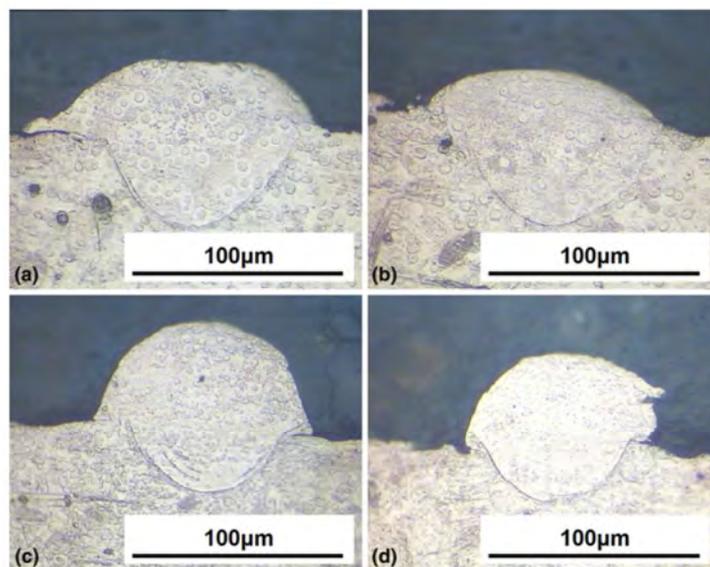


Figura 2.21: Variación del tamaño del cordón en función de la variación de la velocidad a) 90 b) 120 c) 150 d) 180 mm/s. Fuente: (Li et al., 2009)

No obstante, para determinar el comportamiento de mojabilidad de los cordones es necesario cuantificar la dimensión a través de un parámetro que sea significativo. Como se muestra en la Figura 2.22, Yadroitsev (Yadroitsev & Smurov, 2010) utiliza el ancho del cordón (1-2) y el ancho de la penetración (3-4) para poder compararlo con la variación de las

velocidades. Los resultados que se obtienen muestran la misma conclusión: el baño fundido disminuye al aumentar la velocidad de escaneo.

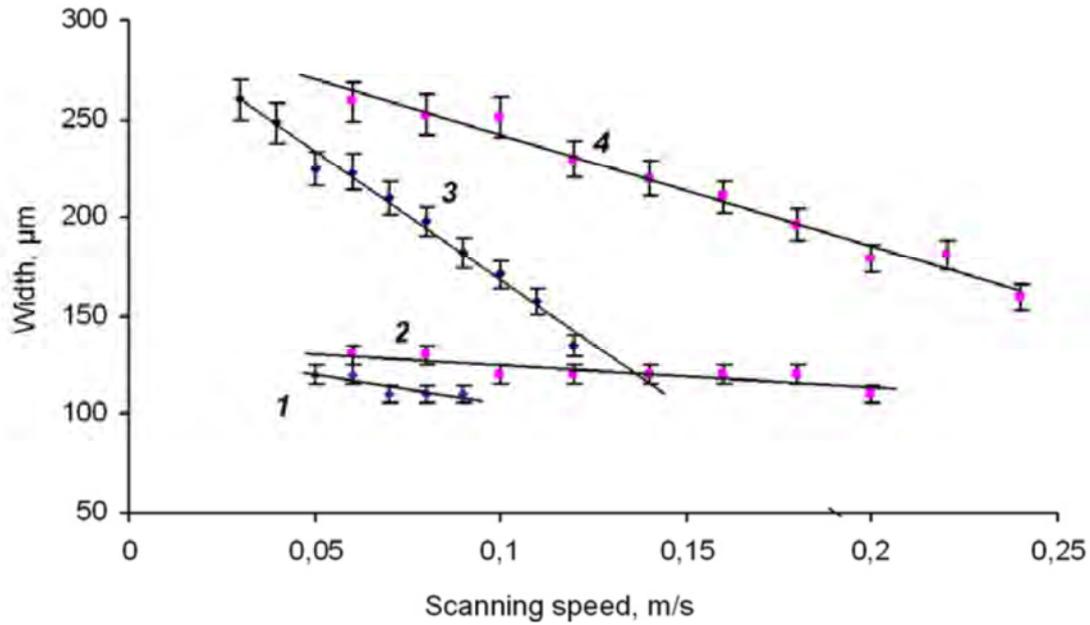


Figura 2.22: Variación del tamaño del cordón en función de la variación de la velocidad. Fuente: (Yadroitsev & Smurov, 2010)

La velocidad de escaneo también tiene una repercusión sobre las propiedades físicas y mecánicas del material fundido (Li et al., 2009). Se pueden obtener distintas porosidades (Figura 2.23a) controlando la velocidad de escaneo y también obtener distintas resistencias a tracción (Figura 2.23b) (Zhang, et al. 2011).

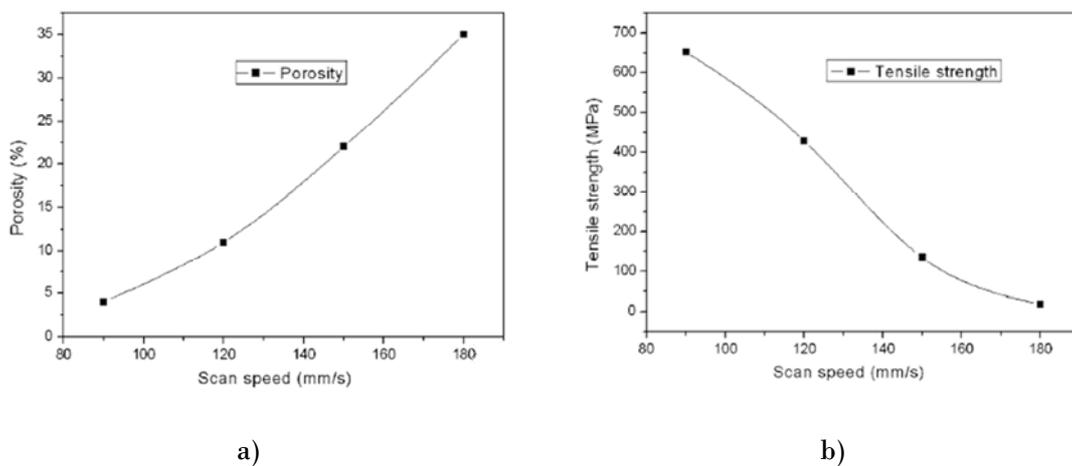


Figura 2.23: Variación de la velocidad para obtener distintas a) porosidad b) resistencia a tracción. Fuente: (Yadroitsev & Smurov, 2010)

Al disminuir la velocidad de escaneo, se consigue una mayor densidad en las piezas debido a que existe un mayor tiempo de interacción entre el láser y el material. Esto conlleva que se incremente la temperatura y disminuya la viscosidad, provocando que el oxígeno que se encuentra entre las partículas pueda escapar, el material penetre y se adhiera mejor a la capa inferior, obteniendo así, una mejor conexión entre capas y una mejor resistencia.

Así, en cada una de las capas del proceso se puede controlar la porosidad y la tensión, incluso, dentro de la misma capa se puede realizar una variación de la velocidad de escaneo para modificar la porosidad y la resistencia a tracción. Esta estrategia es utilizada para la compañía EOS para poder aumentar la velocidad de construcción, dando una mayor resistencia y densidad en las partes externas de la pieza y menor en las partes internas.

2.5.2 Altura de capa de polvo (LT)

La altura de capa de polvo (LT), es la altura que debe recorrer la plataforma para construir, capa a capa, los objetos en 3D. El proceso para determinar la altura de capa se obtiene de los cortes que se realizan en el modelo. Existen dos condiciones básicas en la realización del corte. En el primer caso los cortes generan los contornos con la intersección con el modelo y, en segundo caso, los planos son paralelos entre ellos.

Aunque la mayoría de tecnologías utilizan un altura de capa constante o uniforme (Liao & Chiu, 2001, Luo et al., 1999), normalmente unas 100 micras para polímeros y de 20 a 40 micras en el caso de materiales metálicos, también se puede utilizar una altura de capa adaptativa, donde la altura de capa va variando según el diseño o las características del modelo (Kulkarni & Dutta, 1996; Zhou, 2004).

La mínima altura de capa de polvo que se puede esparcir en la plataforma de construcción debe ser más grande que el tamaño de las partículas del polvo. Esta limitación ocurre porque es necesario poder suministrarla correctamente de forma constante y uniforme a lo largo de toda la plataforma (Agarwala et al., 1995). Según Gibson (Gibson & Shi, 1997) también existe una altura de capa máxima, la cual viene limitada por la penetración del láser en el polvo y, en definitiva, es función de distintos parámetros del proceso como la potencia del láser, la densidad de energía, la dimensión de la partícula, la densidad de potencia, la capacidad calorífica y la conductividad térmica del polvo entre otros.

Cuando la geometría del modelo no contiene paredes verticales es necesario definir qué tipo de contorno se debe utilizar para ajustar la fabricación con el modelo (Figura 2.24). Esto hace que se obtenga un sobre grosor o reducción de la pieza, dando así, un error dimensional debido al ajuste de la geometría y a la altura de capa de polvo.

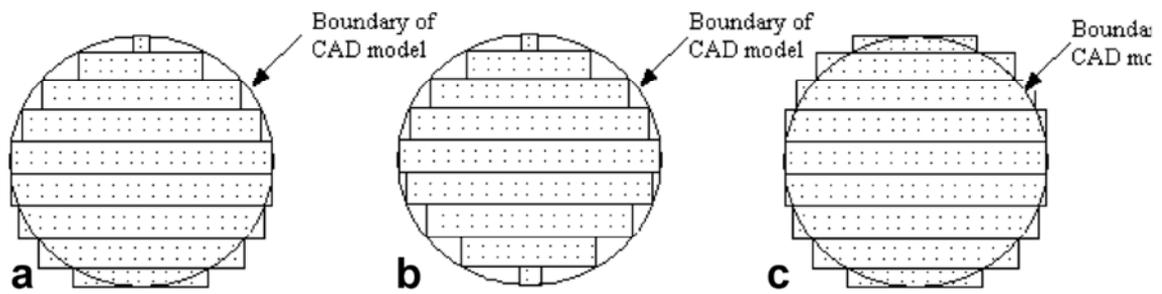


Figura 2.24: Tipo de tolerancia entre el diseño y la pieza final a) Negativa y positiva b) Negativa c) Positiva Fuente: (Zhou, 2004)

Además, la altura de capa genera el efecto escalón (Figura 2.25) debido a la diferencia de dos capas consecutivas (Gibson & Shi, 1997). Los escalones son más grandes a medida que se va incrementando la altura de capa, en este caso, también aumenta el error dimensional y la rugosidad. Por el otro lado, se reduce el tiempo de fabricación y el coste de la pieza (Hope et al., 1997; Ma & He, 1999). Por este motivo es importante buscar un balance entre la calidad y el coste.

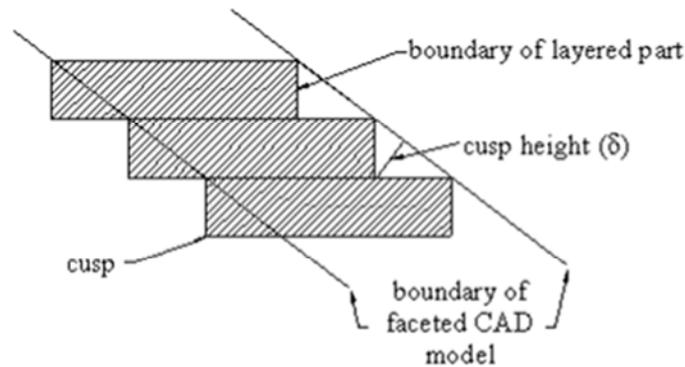


Figura 2.25: Efecto escalón en pendiente Fuente: (Dolenc & Makela, 1994)

Para determinar el error dimensional se realizan dos tipos de comparaciones, la máxima altura de la cúspide o la máxima diferencia entre la capa y el plano (Figura 2.26). En los dos tipos de comparaciones se calcula la diferencia entre la geometría real de la pieza y la geometría de fabricación. En el primer caso, la distancia se calcula en la dirección normal a la geometría CAD y en el segundo caso, es la máxima separación entre el CAD y la geometría generada por la capa. En el caso de la altura de capa variable, si el error es superior al rango establecido entonces se debe disminuir la altura de capa y volver a calcular (Hope et al., 1997).

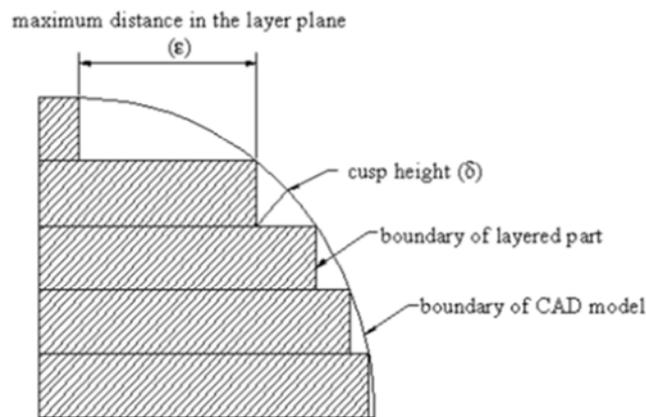


Figura 2.26: Tipos de errores dimensionales. Fuente: (Hope et al., 1997)

También se puede optar a utilizar alturas adaptativas no solo para obtener una reducción de los errores geométricos sino para adaptarse a los distintos atributos que pueda tener el modelo (color, materiales, propiedades mecánicas, físicas, etc.). En este caso, las capas van variando para adaptarse al modelo, ya sea a través de una modificación geométrica o bien a través del propio atributo (Zhou, 2004).

Como se ha comentado anteriormente, la altura de capa influye en la rugosidad superficial porque aumenta o reduce el efecto escalón, de forma que también modifica el resultado en la rugosidad (Figura 2.27).

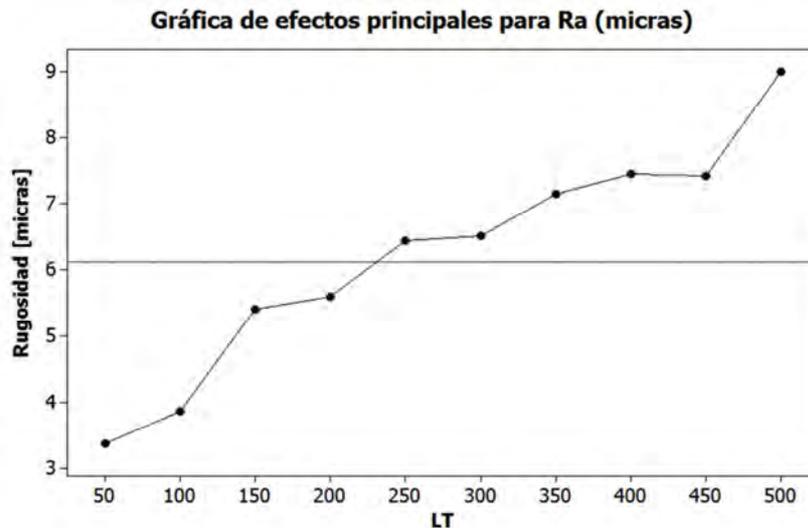


Figura 2.27: Rugosidad según distintos grosores de capa.

Algunos autores como Paul (Paul & Baskaran, 1996) diferencian la rugosidad superficial de la textura superficial, generando así dos conceptos distintos: la rugosidad es causada por los granos y la textura por las capas. Algunos autores Kruth et al., Wang et al.,

Ghany & Moustafa, Vandenbroucke & Kruth (Kruth et al., 2004, Wang et al., 2006, Ghany & Moustafa, 2006, Vandenbroucke & Kruth 2007) no utilizan los dos términos y evalúan la rugosidad siguiendo la normativa ISO (ISO 4287, 1997), es decir, evalúan la textura como la rugosidad superficial.

Uno de las problemáticas de las piezas fabricadas utilizando la SLS, SLM y en la mayoría de tecnologías aditivas es el acabado superficial de las piezas obtenidas. Esta problemática es aún más importante cuando la pieza se debe utilizar en test aerodinámicos (Paul & Baskaran, 1996) ya que la rugosidad puede modificar los resultados. Por este motivo es necesario un post-procesado con el objetivo de mejorar el acabado superficial. En algunos casos, este tipo de proceso debe ser realizado por un profesional y puede ser sumamente complicado de realizar según la geometría de la pieza.

Los dos métodos disponibles para reducir el efecto escalera (Figura 2.28) son, tal y como se ha comentado anteriormente, modificar la altura de capa o bien modificar el ángulo de la pieza, es decir, cambiar la dirección. En ambos casos, aparecen más peldaños, pero el error es más pequeño, dando así una menor rugosidad superficial. Según Vandenbroucke & Kruth (Vandenbroucke & Kruth, 2007) el efecto escalera no tiene un efecto en la rugosidad superficial cuando los ángulos son superiores a 75°.

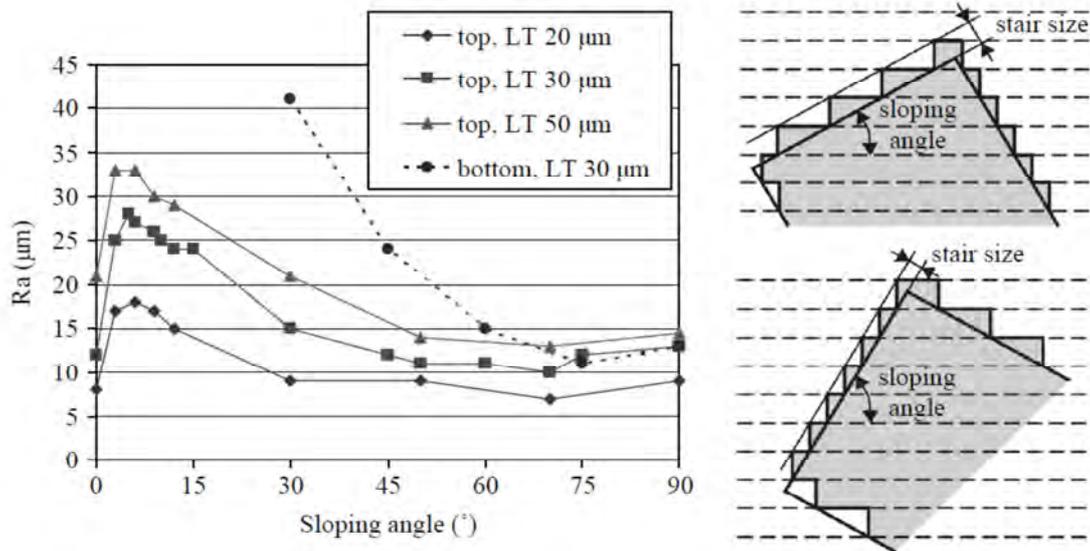


Figura 2.28: Influencia del ángulo y la altura de la capa en la rugosidad. Fuente: (Vandenbroucke & Kruth, 2007).

La rugosidad superficial depende de varios factores, entre ellos, del material, potencia, dimensión de la partícula, de la altura de capa de polvo, parámetros del láser, parámetros de escaneo, estrategia y de los tratamientos de la superficie en el post-proceso (Tabla 2.3). Además, la rugosidad de la superficie superior difiere fuertemente de la rugosidad de la superficie frontal o lateral (Vandenbroucke & Kruth, 2007).

Proceso	Ra (frontal)	Ra (superior)
Acabado máquina	15	15
Chorroado	12	8
Ultrasonido	7	5

Tabla 2.3: Distintas rugosidades del CoCr en SLM. Fuente: (Vandenbroucke & Kruth, 2007)

Una forma para reducir la rugosidad superficial de la parte superior es reduciendo la capa de material, de este modo aumentamos la conductividad térmica del material y obtenemos un baño de material fundido más estable que se distribuye mejor en la superficie.

2.5.3 Estrategia de fabricación

La estrategia de fabricación es un conjunto de acciones que nos definen los caminos por donde debe pasar el láser así como la secuencia que debe seguir para fundir toda la sección de la pieza. Normalmente, cada una de las máquinas AM tienen un software específico que realiza este tipo de acciones y que se optimiza para cada uno de los materiales, reduciendo así el tiempo de escaneo o influenciando en las propiedades de la pieza final.

La estrategia es uno de los parámetros que influencia más en la fabricación de la probeta, ya que es la que determina la velocidad, la dirección y como se debe ordenar el proceso de fundición. Las propiedades mecánicas, precisión, tensiones y el tiempo de escaneo se ven influenciados por este parámetro (Khaing et al., 2001).

En este apartado se analiza cómo afecta la estrategia de fabricación y la utilización de distintas maniobras para evitar tener problemas debido a deformaciones térmicas. Muchas máquinas comerciales modifican los parámetros en una misma pieza de modo que la estrategia va variando dependiendo de la situación que se encuentre dentro de la sección (Figura 2.29). Así, la estrategia busca obtener densidades altas cerca de la superficie externa de la pieza mientras que, en el interior de la pieza, se utilizan otros parámetros para conseguir menor densidad. Todo ello para obtener piezas mucho más económicas aumentando el volumen de construcción y reduciendo el tiempo de fabricación (Shellabear & Nyrhila, 2004). Según las especificaciones de la pieza final, en algunos casos se utiliza únicamente la corteza para aumentar su densidad y su resistencia. Aunque los nombre varían dependiendo de la empresa se definen normalmente 4 tipos:

1 – Corteza

2 – Corteza exterior

3 – Corteza interior

4 – Núcleo

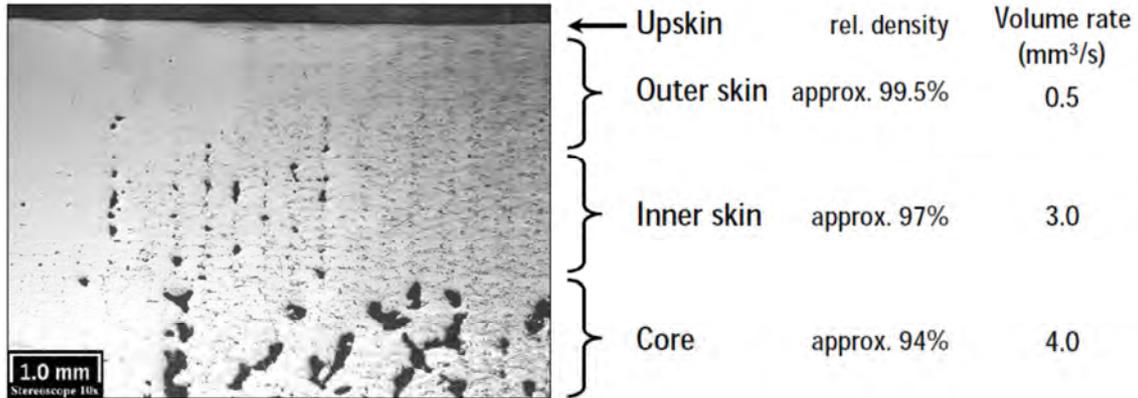


Figura 2.29: Tipo de estrategia según distancia a la superficie. Fuente: (Shellabear & Nyrhila, 2004)

Kruth (Kruth et al., 2004) utiliza distintas estrategias de fabricación (Figura 2.30a) para determinar cómo se comportan las tensiones debido a las dilataciones térmicas, que además de provocar deformaciones (Figura 2.30b) también provocan tensiones. En los dos primeros métodos utilizados por Kruth, se utilizan las estrategias que se usaban inicialmente en los procesos de SLS y SLM. En los otros métodos, se divide el área a escanear en distintos cuadrados de 5 x 5 mm (estrategia 3 y 4) y de 2,5 x 2,5 mm (estrategia 5 y 6).

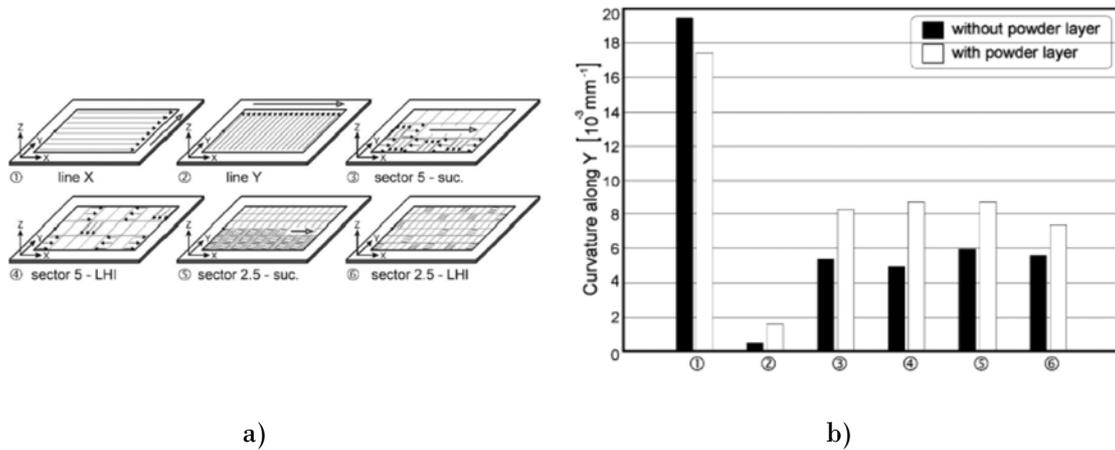


Figura 2.30: Afectación estrategia de fabricación a) vectores y escaneado b) deformaciones. Fuente: (Kruth et al., 2004)

La diferencia entre los distintos cuadrados con la mismas dimensiones (3 con 4 y 5 con 6) es el orden con el que irradia el láser. En el caso de los métodos 3 y 5, el escaneo se realiza de forma sucesiva, escaneando vectores inicialmente paralelos al eje X y, una vez terminado, continuando por el eje Y. El escaneo de los métodos 4 y 6 se realiza el primer escaneo en un cuadrado al azar y, una vez terminado, se irradia al cuadrado que está más

alejado. Los resultados (Figura 2.30b) muestran que, comparando los dos métodos, es preferible usar los cuadrados sucesivos debido a que no presentan un gradiente térmico tan grande como el de los otros casos (Kruth et al., 2004). Si se compara según la dimensión del vector, se observa que no existe una diferencia significativa entre las distintas dimensiones de los vectores, ya que, durante el experimento se realiza una corrección de la densidad de energía que se aporta al polvo (Kruth et al., 2004).

La estrategia de fabricación se utiliza también para reducir las tensiones internas de la pieza. Para obtener una menor tensión, se divide el área en distintas partes, no obstante, esta división se puede realizar de distintas formas (Merzelis & Kruth, 2006):

1. Escanear la pieza a la largo del ancho de la pieza
2. Escanear la pieza a lo largo de la longitud de la pieza
3. Escanear la pieza de forma aleatoria
4. Escanear la pieza minimizando el efecto térmico entre los diferentes sectores

Si se utilizan longitudes del vector de escaneo cortas, las áreas adyacentes son escaneadas muy rápidamente, consiguiendo que la temperatura no disminuya (Figura 2.31a). Por el otro lado, si el vector de escaneo es largo, el enfriamiento es superior pero a la vez se disminuye la mojabilidad del material (Kruth et al., 2004). Utilizando una longitud corta del vector, se consigue una temperatura más estable y uniforme, obteniendo así, unas propiedades mecánicas más uniformes en toda la pieza (Figura 2.31b-c)(Gibson & Shi, 1997).

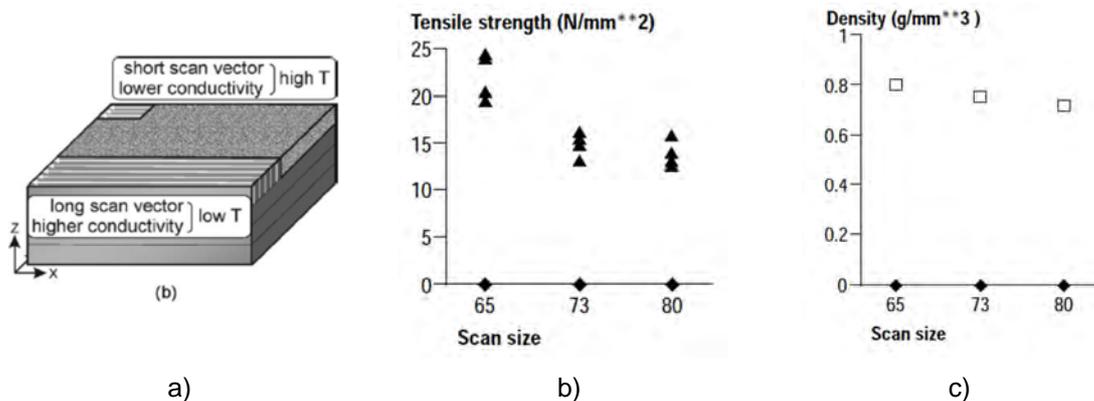


Figura 2.31: Influencia de la longitud de escaneo en a) temperatura (Kruth et al., 2004) b) tensión a tracción (Gibson & Shi, 1997) y c) densidad (Gibson & Shi, 1997)

La compensación del diámetro del haz láser sirve para poder tener un control sobre la geometría final de la pieza. Puede utilizarse para obtener una sobredimensión, una dimensión más pequeña u obtener la dimensión nominal de la pieza según el lugar por donde pasa el láser. No obstante, no es posible obtener la geometría exacta de la pieza debido a que el haz láser tiene unas dimensiones finitas.

En el caso de que la pieza tenga puntas muy abruptas (Figura 2.32), es necesario definir que compensación del láser se quiere aplicar. De forma que en el caso de la Figura 2.32a se obtiene un recrecimiento de todas las esquinas, mientras que en la Figura 2.32b se realiza una estrategia donde la pieza que se obtiene es más pequeña que la nominal. La utilización de la primera estrategia puede requerir un post-proceso para obtener la geometría final deseada.

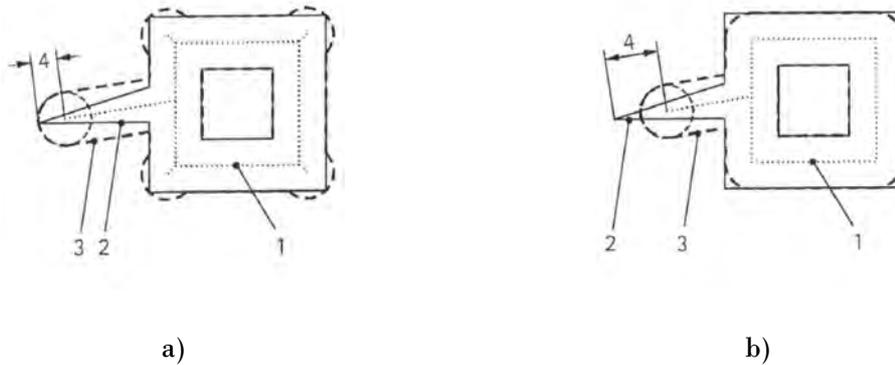


Figura 2.32: Compensación del haz a) sobrecrecimiento b) reducido

El estudio realizado por Delgado (Delgado et al., 2012) analiza la influencia de los parámetros del proceso. En él, se modifica la altura de la capa, la velocidad de escaneo y la dirección de construcción. Variando estos parámetros, se puede observar que las dos probetas de ensayo a tracción rompen siguiendo los vectores de escaneo (Figura 2.33), complicando que en los cambios de dirección del vector hay una disminución de la unión entre la misma capa.

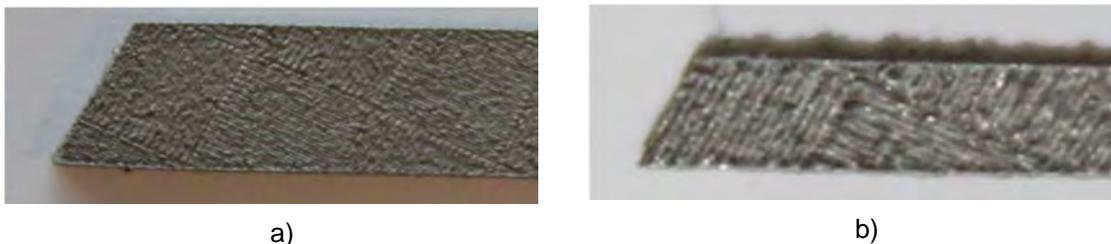


Figura 2.33: Imagen de la pieza de tracción rota a) 0° and b) 90°. Fuente: (Delgado et al., 2012)

2.5.3.1 Distancia y solapamiento de cordones

La distancia entre cordones es el espacio que existe entre dos líneas paralelas que son contiguas, de este modo, se define la separación entre cordones o de escaneo. Dependiendo de la distancia que hay entre los dos cordones contiguos y la dimensión del cordón se puede observar el solapamiento del cordón. Por el contrario, si se aumenta la separación entre cordones se obtiene la formación de dos cordones sin contacto. El solapamiento y, por lo tanto la distancia entre líneas, tiene una influencia directa en la pieza influenciando en la

calidad del cordón y su rugosidad. Además, si los cordones se solapan, la densidad que reciben es distinta a la que pueden recibir si no lo hacen (Gibson & Shi, 1997).

El solapamiento se puede evaluar de dos formas distintas. Se puede tener en cuenta únicamente el diámetro del haz del láser y la separación entre dos escaneos paralelos (Ecuación 2.6) siguiendo el esquema de la Figura 2.34 donde se muestra el diámetro del haz láser en vista superior.

$$O = \frac{\phi_l - S_s}{\phi_l} \cdot 100 \tag{Ecuación 2.6}$$

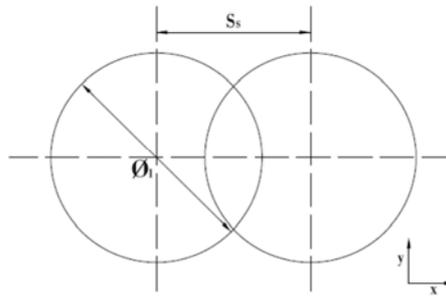


Figura 2.34: Sobre posición del cordón por diámetro.

O se puede calcular el solapamiento teniendo en cuenta la geometría del cordón (Wang et al., 2012) y por lo tanto, se calcula el solapamiento (Ecuación 2.7) a través del ancho del cordón (Figura 2.35). El problema del ancho del cordón es que se puede modificar cuando los parámetros del proceso varían.

$$O = \frac{W_c - S_s}{W_c} \tag{Ecuación 2.7}$$

En este segundo caso, no aparece ningún término relacionado con el láser. Para calcular el solapamiento se precisa definir el ancho del cordón porque la distancia entre escaneos es definida. Como los cordones que se obtienen no son perfectos, existen varias aproximaciones para definir este ancho. En primer lugar, se puede realizar calculando el perfil de un cordón simple. Otro sistema puede ser, calculando la anchura media de varios cordones solapados. Un tercer método sería calcular el área del cordón y el diámetro teniendo en cuenta que se parte media circunferencia (Averyanova et al., 2012).

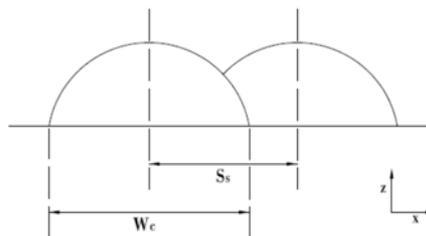


Figura 2.35: Sobre posición del cordón geométrico.

De este modo, se puede observar que variando la separación entre cordones (Figura 2.36) disminuyen las propiedades mecánicas y la densidad de las piezas producidas debido a que la distancia entre barridos aumenta y, por lo tanto, es más difícil rellenar los espacios vacíos por el material líquido (Gibson & Shi, 1997).

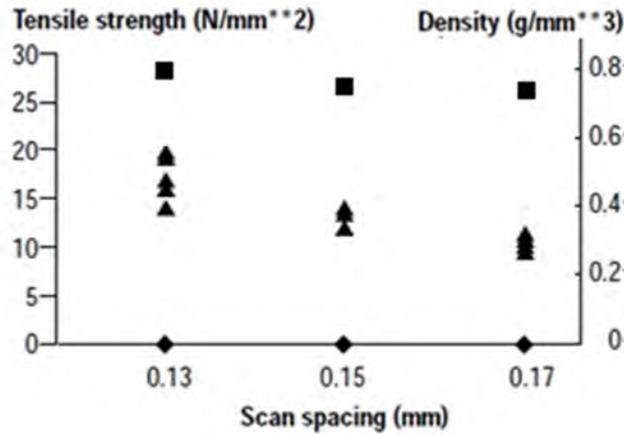


Figura 2.36: Sobre posición en la tensión (Δ) y la densidad (□). Fuente: (Gibson & Shi, 1997)

El solapamiento de los cordones supone que exista una ondulación en la superficie y por lo tanto, puede influir en las propiedades mecánicas ya que genera porosidad en la pieza (Wang et al., 2006).

Los resultados de la densidad en función de la velocidad y de la distancia entre barridos (Figura 2.37) también demuestran que se obtienen piezas más densas (99,98%) a partir de una distancia de separación más corta y una baja velocidad. Por el contrario, una velocidad alta y una separación muy grande de cordones, supone una mayor porosidad (95,11%) en la pieza final (Vandenbroucke & Kruth, 2007).

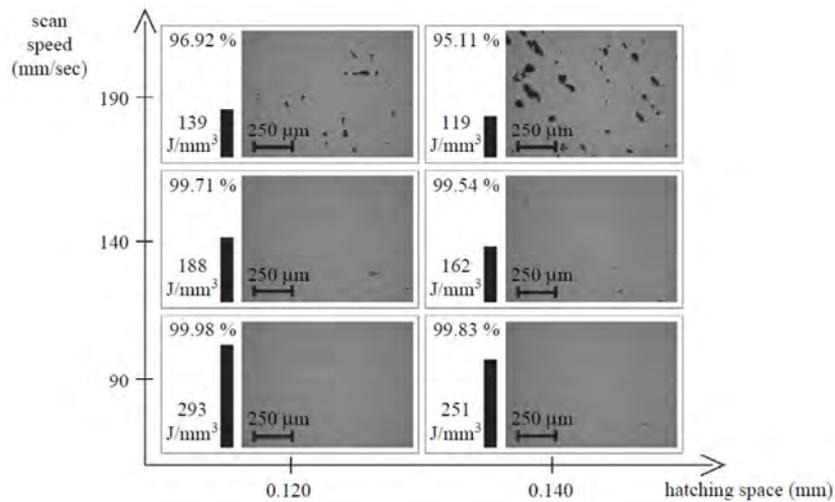


Figura 2.37: Densidad en función de la velocidad de escaneo y la distancia entre barridos. Fuente: (Vandenbroucke & Kruth, 2007)

2.5.4 Deposición de material

La deposición de material se refiere al tipo de sistema utilizado para colocar una capa de polvo en la zona de construcción. Desde el inicio de la fabricación aditiva, se han patentado distintos sistemas para poder depositar las capas de polvo. Uno de los sistemas iniciales era el de pulverización del polvo (Figura 2.38a) (Ciraud, 1973). Otro utilizaba la técnica de Arcella (Arcella et al., 1988) donde hay un recipiente que se va rellendo a medida que va aumentando el número de capas y el material se posiciona mediante movimiento (Figura 2.38b).

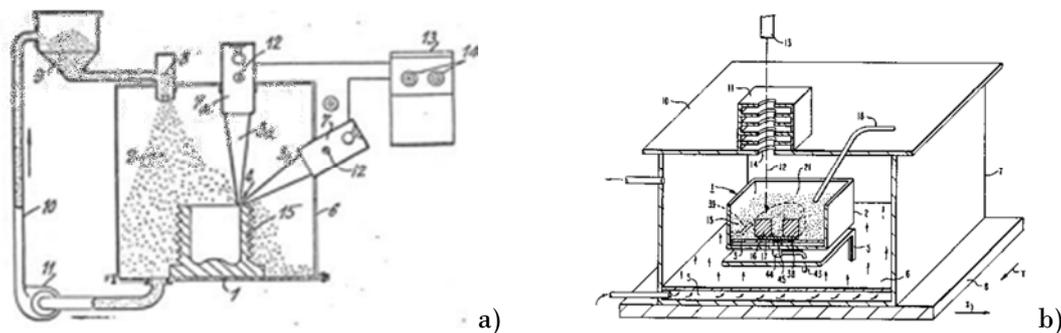


Figura 2.38: Deposición por a) pulverización (Ciraud, 1973) b) método de Arcella (Arcella et al., 1988)

Estos dos sistemas no fueron muy populares (Shellabear & Nyrhila, 2004) porque no permitían un control preciso de la altura y de la distribución de las capas de polvo. No obstante, aparecieron otros sistemas de distribución. La compañía EOS patentó su propio sistema de deposición de polvo mediante una escoba rígida (Lohner et al., 1995). La empresa Trumpf (Graf & Lindemann, 2001) desarrolló también un sistema que utilizaba una escoba rígida, la cual repartía el polvo de forma que se obtenían unas capas con una alta repetibilidad.

Según estudios realizados por Kruth (Kruth et al., 2004), la densidad del polvo depositado se encuentra alrededor del 40%. Esta densidad del polvo tan baja es un problema debido a que cuando se realiza la fundición se requieren densidades cercanas al 99%. Es decir, la altura de la capa fundida es mucho más baja que la altura de polvo depositada, o bien, que debería recolectar el polvo de los lados para poder rellenar el cordón. Según Lu (Lu et al., 2001), la densidad de las piezas fabricadas mediante SLS se ve afectada por la compactación inicial del polvo. En el caso de utilizar un sistema que aumente la compactación inicial el material fundido tiene más dificultades para moverse entre las partículas. No obstante, una mayor compactación significa una mayor transferencia térmica, es decir, una mejor transmisión de calor.

Las deposiciones típicas de un proceso de SLM suelen estar entre las 20 a 50 micras. No obstante, se han realizado piezas a escala micrométrica con capas del orden de nanómetros. Para poder llegar a estas precisiones de micras, la deposición de polvo se realiza

mediante rodillos o bien a través de una rasqueta que desplaza el polvo de la plataforma de aportación de material a la de fabricación (Kruth et al., 2005).

Dependiendo de las máquinas comerciales, las deposiciones se pueden realizar o bien en un solo sentido o bien en los dos sentidos. Esto afecta mayoritariamente al tiempo de fabricación y en la dimensión de la máquina ya que en el caso del doble sentido se requiere de la duplicación de algunos elementos dentro de la máquina: dos plataformas de aportación de material y de dos lugares para retirar el polvo sobrante. Los problemas que pueden acontecer con la aportación en doble sentido están relacionados con la suciedad que puede acarrear el rodillo de la plataforma de fabricación hacia las plataformas de aportación y viceversa.

Otro problema que existe en la deposición de material a través de rodillos, es que por debajo de un espesor de capa determinado, el mecanismo de rodillos tiende a desplazar las capas previamente sinterizadas, separándolas de la plataforma de trabajo y dificultando la creación de la geometría (Delgado et al. 2010).

Únicamente se conoce de un estudio publicado (Van der Schueren & Kruth, 1995) que analiza los sistemas de deposición para el proceso de SLS y SLM, si bien es cierto que algunos realizan un análisis poco preciso del sistema que utilizan en su investigación. Van Der Schueren analiza tres tipos de depositadores de polvo (Figura 2.39) que actualmente se usan en las máquinas comerciales como mecanismos para depositar el polvo.

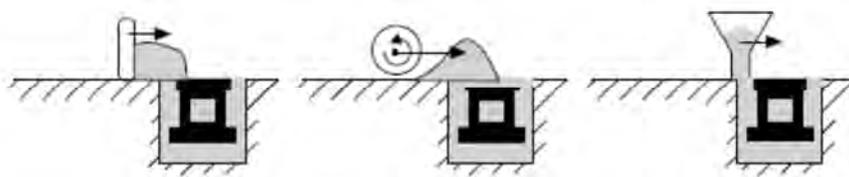


Figura 2.39: Diferentes sistemas de deposición del polvo. Fuente: (Van der Schueren & Kruth, 1995)

El primer sistema se basa en una escoba o rasqueta que moviliza una cantidad fija de material. Este material es subministrado por la plataforma de aportación y debe exceder al volumen de material necesario a repartir. La rasqueta se mueve de forma que reparte el material por la plataforma de construcción. Este sistema, capaz de depositar una capa de material, no permite compactar el material y en el caso que la pieza sobresalga puede provocar un impacto. Además, el material que todavía no se ha depositado puede friccionar contra la pieza. El problema de falta de compactación se puede solucionar utilizando el segundo mecanismo propuesto: un cilindro. En este caso, además de la rotación para ir avanzando, se realiza una vibración, de forma que compacta el polvo. Aun así, siguen sin solucionarse los demás problemas que se tenían en la rasqueta. La tercera propuesta consta de un mecanismo que utiliza una ranura de alimentación por gravitación, esta ranura contiene una cierta cantidad de polvo y lo esparce en aquellos lugares donde existe un hueco entre la ranura y la plataforma. Este mecanismo permite disminuir la fricción ya que el contacto es puntual. Aun así, este sistema no permite realizar una compactación del material.

Una de las formas para evitar el contacto agresivo entre el dispensador de polvo y la herramienta de deposición, es la rotación de las piezas unos 15°, de esta forma, el dispensador tiene un contacto puntual inicial que va aumentando a medida que va realizándose el desplazamiento del rodillo o rasqueta (Delgado et al. 2010).

2.5.5 Orientación en la fabricación

La orientación en la fabricación de las piezas sirve para determinar el ángulo en que se va a fabricar la pieza. La fabricación de las piezas tiene tres grandes objetivos: la reducción de los soportes, la reducción del tiempo de fabricación y la mejora de las propiedades mecánicas de las probetas. Las propiedades mecánicas tienen anisotropía, es decir, no tienen un mismo valor según los ejes u orientación en la fabricación (UNE 116005).

Las propiedades mecánicas de las piezas creadas mediante SLM tienen un comportamiento distinto según la orientación en la fabricación ya que la unión entre las partículas de la misma capa no es igual que la unión entre capas (Gibson & Shi, 1997). La posición de la pieza dentro de la plataforma de construcción tiene, según el tipo de máquina, un efecto que perjudica las propiedades mecánicas debido a que no existe un reajuste de la focalización del láser según la posición en la placa. Si esto acontece y no se modifican los parámetros se obtiene una menor densidad de energía en las partes externas (Figura 2.40).

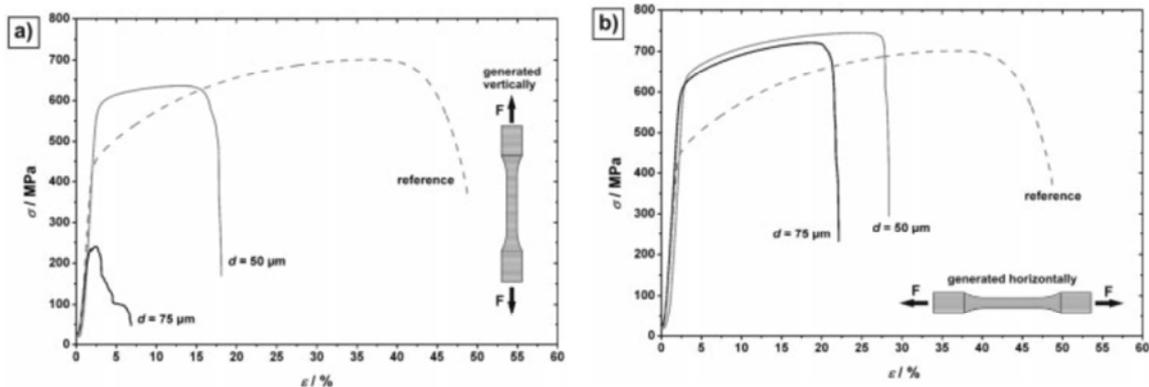


Figura 2.40: Propiedades mecánicas en función de la dirección de fabricación y grosor de la capa a) vertical b) horizontal. Fuente: (Meier & Haberland, 2008)

Según Gibson (Gibson & Shi, 1997), para tratar de tener piezas con un menor error dimensional, se deben orientar de modo que se obtengamos una menor sección de área evitando distorsiones y el rizado de las piezas.

Aunque los fabricantes de las tecnologías SLS y SLM hablan de que no es necesaria la fabricación de soportes argumentando que el polvo depositado soporta la pieza sinterizada, se deben utilizar soportes para evitar el movimiento de las piezas al depositar una nueva capa de polvo. Si bien es verdad que se están llevando a cabo estudios para tratar

de orientar y diseñar las piezas con el objetivo de evitar el uso de soportes. Según Vandembroucke (Vandembroucke & Kruth, 2007) las superficies con un ángulo inferior a 20 grados no son posibles de fabricar sin la construcción de soportes. Estas piezas tienen un acabado inaceptable debido a una baja conductividad térmica, al no tener una base para transferir el calor y provocando inestabilidades en el baño fundido.

A parte de las propiedades mecánicas y de la construcción de los soportes, es necesario estudiar la orientación de las piezas porque tiene una gran influencia en el tiempo de construcción que repercute en el precio final.

2.5.6 Atmosfera

Durante los procesos de SLM y SLS existen un aumento de la temperatura del polvo para llegar a fundir o sinterizar el material. De este modo, existe una tendencia natural a que el material se oxide y se degrade. Por ello se realiza un control de la atmosfera para minimizar la oxidación a través de la introducción de un gas inerte que desplaza o disminuye el contenido de oxígeno en la cámara de fabricación (Ghany & Moustafa, 2006). Si no se realiza un control de la atmosfera puede causar una incorrecta mojabilidad entre la fase líquida y la fase sólida, es decir, en la primera capa entre la plataforma y el polvo. Por el contrario, con un eficiente control se consigue una superficie más lisa así como una disminución del efecto bola (Agarwala et al. 2005).

Según el material que se usa en el proceso de SLS y SLM, el gas debe ser específico para no interactuar con el material, es decir, inerte (Ghany & Moustafa, 2006). En el proceso de SLS y SLM se usan normalmente tres tipos de gases según el material a procesar: helio, argón o nitrógeno (Lu et al., 2001). Actualmente, además de controlar el porcentaje de oxígeno también se controla la humedad para obtener un mejor control del proceso (Khaing et al., 2001) e incluso las condiciones del flujo del gas (Dadbakhsh et al., 2012).

El control de la atmosfera es cada vez más importante a medida que va aumentando el volumen de material fundido. La absorción de oxígeno hace disminuir la tensión superficial del líquido. Los óxidos metálicos tienen una energía mucho menor que la superficie metálica asociada, dando lugar a una disminución de la humectabilidad. La formación de las capas de óxido también produce impurezas y defectos en las partes producidas, por lo tanto, se debe controlar la atmosfera en los dos procesos, tanto en el SLS como en el SLM (Lu et al., 2001).

Es razonable concluir que el oxígeno en la atmosfera tiende a formar el efecto bola, debido a la oxidación de la piscina de masa fundida y en consecuencia empeorado la característica de mojabilidad entre las distintas capas (Li et al., 2012).

Debido al gran nivel de reacción de los materiales con el oxígeno, nitrógeno, carbón o hidrógeno, y sobre todo del titanio con el oxígeno, el proceso de SLM utiliza varios gases

(Tabla 2.4) para evitar la oxidación, de forma que desplaza el oxígeno a niveles por debajo del 0,1% para evitar esta reacción (Vandenbroucke & Kruth 2007).

Gas	Material	Tipo de material
		Maraging Steel
	Acero	Stainless Steel
Helio		DM 20
	Cobalto cromo	Cobalt Chrome MP1
		Cobalt Chrome SP2
	Níquel	IN718
	Aluminio	AlSi10Mg
Argón		Ti6Al4V
	Titanio	Ti6Al4V ELI
		TiCP

Tabla 2.4: Gases utilizados para evitar la oxidación. Fuente: (EOS)

2.5.7 Temperatura de la plataforma

Las tecnologías que calientan el material a una temperatura elevada lo hacen para evitar una contracción muy rápida del material, reduciéndose sus tensiones internas y la energía a suministrar por el láser, debido a que el polvo tiene una temperatura inicial más elevada. Además, de estas ventajas, también reduce la distorsión debido a las dilataciones térmicas y previene del rizado de las piezas (Gibson & Shi, 1997). En el caso de utilizarse materiales estructurales y materiales aglutinantes, la temperatura de la plataforma nunca debe superara a la temperatura de vitrificación del material con una temperatura de vitrificación más baja (Agarwala et al., 1995).

2.5.8 Densidad de energía

La densidad de energía suministrada al material (Meier & Haberland, 2008) es un subproceso muy importante a la hora de conseguir una correcta fundición. El subproceso de la densidad de energía (Ecuación 2.8) que se suministra al material depende únicamente de cuatro variables: la potencia, la velocidad de escaneo, el grosor de la capa y la separación de escaneo. El subproceso de la densidad de energía permite conocer el resultado que se obtendría si se fabricara la pieza con parámetros distintos e igual densidad de energía.

$$E_d = \frac{P_l}{SS \cdot S_s \cdot LT}$$

Ecuación 2.8

Si se aumenta la densidad de energía, la temperatura del polvo aumenta y cada vez el material se vuelve más líquido, mejorando su viscosidad y consecuentemente obteniendo una mejor penetración entre las partículas. Si se excede con la densidad de energía, se pueden obtener unos gradientes térmicos muy elevados que provocarían una deformación por contracción de la pieza o incluso la evaporación del material si se sobrepasa la temperatura de evaporación.

Capítulo 3. Análisis morfológico SLM

En el presente capítulo 3 se analiza la morfología de un cordón simple manufacturado mediante el proceso de SLM. La metodología basada en la densidad de energía permite disminuir la experimentación, además, permite incrementar el conocimiento de cómo afectan los parámetros del proceso (potencia, velocidad de escaneo y grosor de capa) en la formación del cordón. Asimismo, se estudia cómo afectan estos parámetros en las propiedades dimensionales, físicas y mecánicas del cordón obtenido.

3.1 Antecedentes

Uno de los problemas actuales en los distintos procesos de SLS y SLM es la definición de la ventana de parámetros del proceso óptimos para cada material (Wong et al., 2007). El problema recae en qué las interacciones entre los distintos parámetros del láser, material utilizado y del propio proceso no siempre son triviales. Esto significa que una pequeña variación en alguna de las propiedades, puede significar la inestabilidad del proceso y por lo tanto, un cambio crítico en las propiedades resultantes de la pieza.

Por este motivo, se deben investigar los parámetros de fabricación óptimos para cada uno de los materiales, siendo necesario conocer y entender los comportamientos del material, sus propiedades térmicas (Figura 3.1) y de absorción del láser durante el proceso de fundición en las distintas fases del material. Este proceso además requiere de una gran cantidad de revisión literaria, de forma que es preferible utilizar una experimentación basada en una metodología para lograr encontrar los parámetros más influyentes en el proceso.

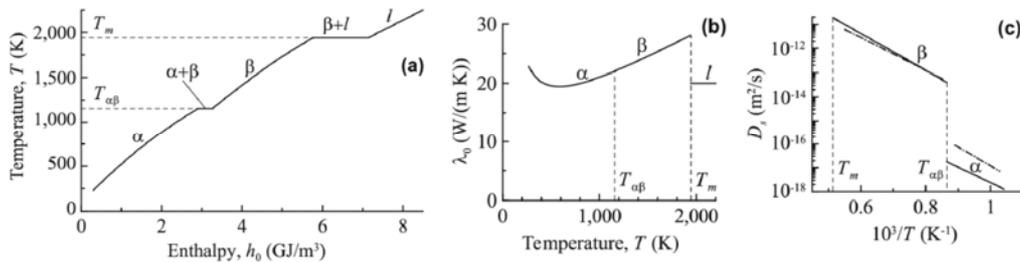


Figura 3.1: Propiedades térmicas del titanio a) Entalpía b) Transmisión térmica c) Coeficiente de difusión para las distintas temperaturas del proceso. Fuente: (Tolochko et al., 2003)

Cada material candidato para AM necesita de la determinación de una ventana específica de proceso (Figura 3.2) de forma experimental ya que cada uno utiliza distintos valores según el proceso y la máquina. Esta determinación servirá para eliminar los defectos e las inestabilidades del proceso, como el efecto bola y la porosidad en los cordones simples. Por este motivo, actualmente el número de materiales comerciales para SLM está limitado (Kruth et al., 2005) y es una de las grandes preocupaciones en AM, por lo que los investigadores pretenden obtener ventanas de fabricación para tipo de tecnología (Agarwala et al., 1995).

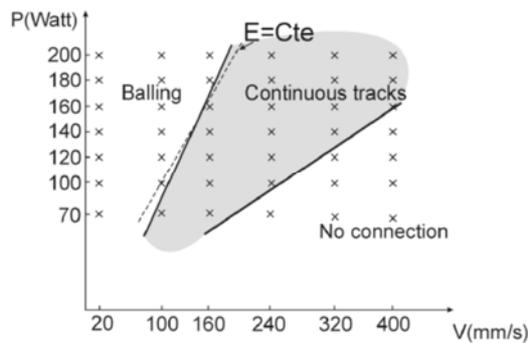


Figura 3.2: Ventana de proceso. Fuente: (Kruth et al. 2005)

Según Van Elsen (Van Elsen et al., 2008), además del conflicto de encontrar los parámetros óptimos, existe información insuficiente lo cual genera problemas en la comparación de resultados entre los distintos grupos de investigación debido a que se

desconoce la similaridad en la metodología experimental, provocando una frecuente contradicción en los resultados.

En los experimentos con parámetros constantes, donde la fuente láser y el material son fijos, los factores que más afectan a la formación del cordón son la altura de la capa de polvo, la velocidad de escaneo, la potencia, el diámetro del haz y la superposición del cordón (Van Elsen et al., 2008, Zhang et al., 2012).

Durante la experimentación, se pueden encontrar comportamientos básicos de la fundición del material los cuales se pueden resumir en 4 fenómenos según la calidad del cordón creado. Por este motivo, los parámetros y sobretodo los subprocesos que acontecen durante la fundición son importantes para obtener un cordón con características de calidad aceptables (Yadroitsev et al., 2010). En una clasificación del comportamiento de la fundición en función del cambio de estado del material se pueden observar varias conductas: primero, que no se obtenga ninguna ligación entre las partículas y por lo tanto, no se realice ninguna sinterización ni fusión del material, en una segunda fase, empieza la fundición de las partículas de polvo las cuales se agrupan mediante bolas, después pasan a cordones discontinuos o irregulares y finalmente a un cordón continuo y estable (Yadroitsev et al., 2012).

Las propiedades de las piezas finales fabricadas mediante el proceso de SLM depende en gran medida de las propiedades de los cordones simples, y por lo tanto, de los parámetros del proceso y del material utilizados (Ning et al., 2005). Para aumentar el número de materiales comerciales que existen en la actualidad, en este capítulo se pretende utilizar una metodología que encuentre la inestabilidad del baño fundido para así poder evitarlo, y finalmente utilizar la prueba de ensayo y error para obtener los parámetros de fabricación adecuados.

El enfoque principal de este capítulo es la obtención de un cordón continuo ideal de acuerdo a unos parámetros de proceso dados y el estudio de sus características para poder en un futuro fabricar piezas tridimensionales, a partir del solapamiento de cordones y la adición capa a capa.

3.2 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos se ha ejecutado en un centro de mecanizado vertical, con una máquina Kondia modelo HS1000 a la cual se le ha acoplado un láser en la torreta, permitiendo con esta configuración tener los movimientos cartesianos del láser de acuerdo al movimiento de los 3 ejes de la máquina, emulando así el movimiento de los espejos

galvanométricos presentes en las máquina comerciales. En el cabezal de la máquina además está acoplado un cabezal de soldadura láser YW30 de la compañía Procitec.

El láser utilizado durante la experimentación (Tabla 3.1) de la compañía Rofin, es un láser de fibra óptica con una longitud de onda de 1080 nm, la cual permite su utilización en materiales metálicos debido a la gran absorción de su energía. La fibra óptica (150 micras) sale del resonador láser y va al cabezal de soldadura, el cual está configurado con un colimador y un focalizador, ambos, de 125 mm que permiten la obtención de un diámetro mínimo del haz láser de 150 micras. Durante la experimentación se ha utilizado exclusivamente este diámetro mínimo del láser.

Compañía	Modelo	Potencia	Longitud onda	Tipo	Calidad	Focalizador y colimador
Rofin	F1 50x	500 W	1080 nm	Yb:Glass	≤ 0.4 mm·mrad	125 mm

Tabla 3.1: Láser utilizado durante la experimentación

El diseño de experimentos planea la fabricación de 80 cordones simples con un sentido único de trayectoria del laser sobre una plataforma inclinada de fabricación, (Figura 3.3) la cual, tiene como objetivo variar la altura de la capa de polvo según la posición dentro del plano y con esto poder analizar la continuidad del cordón además de su adhesión a la plataforma de construcción. El fin experimental es crear un cordón a lo largo de los 230mm del plano inclinado, el cual lograría crear un grosor de capa creciente desde los 40 hasta las 500 μm . En cada uno de los 80 experimentos se mantienen los parámetros del proceso y únicamente se obtiene un cambio en el grosor de la capa del polvo. El material utilizado para la plataforma de construcción es un acero AISI 1045 con dimensiones de 250x250x30mm. El espesor utilizado en la plataforma permite la absorción rápida de la temperatura, resultando en condiciones de fabricación comparables.

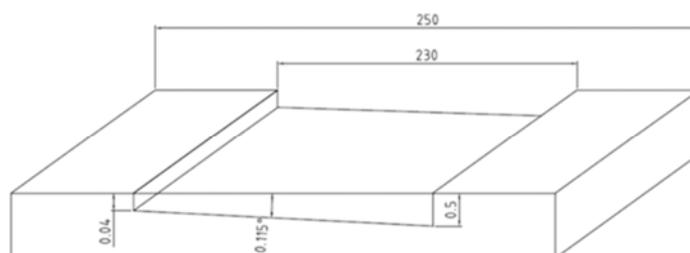


Figura 3.3: Geometría de la placa inclinada. Fuente: (Delgado et al., 2012a)

El plano inclinado fue realizado mediante una rectificadora plana GER modelo SCA-60/40 (Figura 3.4). Para conseguir el plano inclinado se utilizan distintas galgas patrón para obtener el plano inclinado en la pieza. Al ser plana la muela utilizada, se realiza un rectificado de 500 micras para la parte inferior del plano inclinado y solamente se rectifica 40 micras para la parte superior del plano. Si bien es cierto que otras tecnologías, como la electroerosión por hilo, permiten lograr el plano inclinado en la plataforma final; se puede decir que aunque el movimiento de la mesa (eje X) es de poca precisión ya que es controlado mediante impulsos, no obstante, los ejes vertical (eje Y) y transversal (eje Z) de la rectificadora están controlados mediante una alta precisión, asimismo que el plano inclinado al realizarse realiza a lo largo de toda la pieza no es necesario un control del inicio y final del recorrido.



GER SCA-60/40		
Máxima superficie rectificable	600x450	mm
Plato magnético	600x400	mm
Altura de la mesa al centro de la muela	525	mm
Resolución	0,001	micras
Tamaño de la muela	300x50x76	mm

Figura 3.4: Características principales rectificadora GER SCA-60/40

En el diseño de experimentos es un diseño factorial completo que utiliza 20 niveles de potencia del láser, 4 niveles de velocidades de escaneo y 10 niveles de altura de la capa de polvo, debido a los cortes realizados en la placa, según se puede observar en la Tabla 3.2. La experimentación asimismo se ha realizado en un ambiente no controlado, es decir, no existe un control de humedad ni del porcentaje de oxígeno.

Experimentos	Parámetro	Mínimo	Máximo	Incremento	Niveles
80	P [W]	25	500	25	20
	SS [mm/s]	33,3	83,3	16,7	4
	LT [μ m]	40	500	continuo	(10)

Tabla 3.2: Diseño de experimentos: (Delgado et al., 2012a)

El parámetro de salida, en el análisis de la experimentación, es la densidad de energía (Wang et al., 2012). La densidad de energía se define como la cantidad de energía que suministra el láser por unidad de volumen de polvo, por lo tanto, cada combinación en el diseño de experimento resulta en un valor de densidad de energía puntual. La densidad de energía es, presumiblemente, el factor más influyente en la formación del cordón y viene determinada por la fundición de un cordón. La densidad de energía está definida por la potencia del láser [W], la velocidad de escaneo [mm/s], el grosor de la capa [mm] y el diámetro del láser [mm] (Ecuación 3.1).

$$E_d = \frac{P_l}{SS \cdot LT \cdot \phi_l} \tag{Ecuación 3.1}$$

Dentro del diseño de experimentos existen un rango de distintas potencias, y en la Figura 3.5 se puede observar que los 80 experimentos están agrupados en 4 familias de velocidades y dentro de la misma experimentación el grosor de la capa va variando debido al plano inclinado de la plataforma.

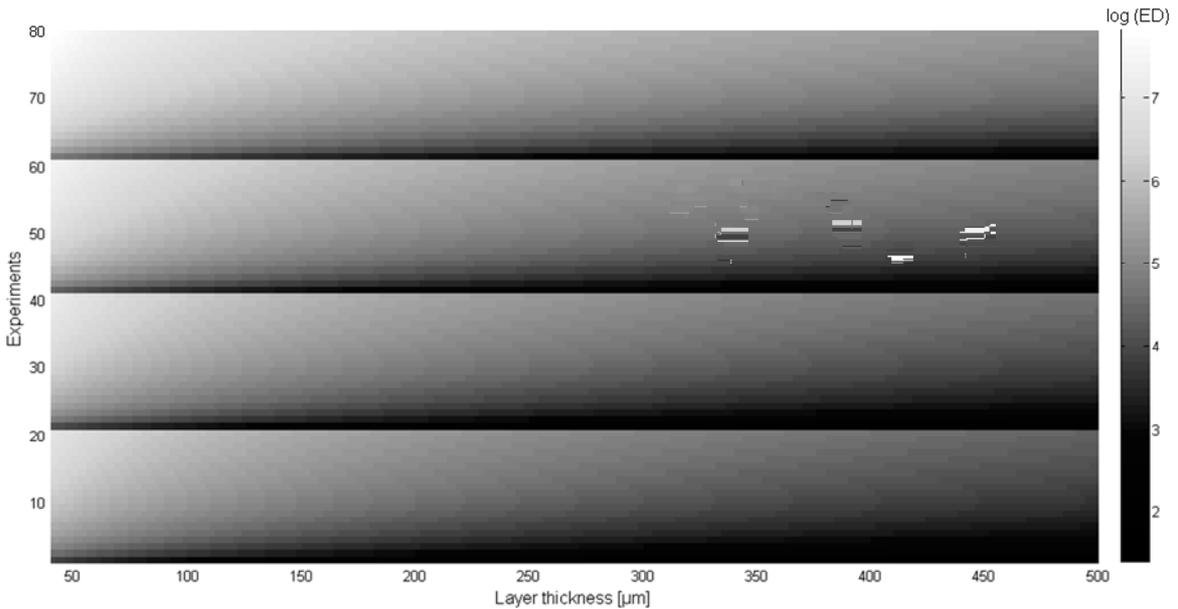


Figura 3.5: Densidad de energía del diseño de experimentos. Fuente: (Delgado et al., 2012a)

El objetivo de la experimentación es crear un cordón continuo óptimo para después poder realizar el solapamiento de cordones y posteriormente, obtener una capa ideal. Una vez obtenida esta capa, con los parámetros adecuados, utilizarlos para formar la pieza en 3D a través de la adición de capas. Según Li (Li et al, 2012), ésta es la única metodología posible para poder obtener piezas con una alta calidad.

3.3 Material CoCrMo

La tecnología AM y sobretodo el SLM tiene un gran potencial en la de fabricación de componentes médicos, prótesis e implantes debido a que los productos deben ser personalizados y poseen un alto valor añadido. La aleación de Cobalto Cromo Molibdeno (CoCrMo) es una aleación de material ampliamente utilizado en las aplicaciones biomédicas, sobretodo en implante quirúrgicos y dentales, debido a que es el material biocompatible más duro conocido además de tener una alta resistencia a la corrosión y al desgaste (Vandenbroucke & Kruth, 2007). Su alta resistencia a la corrosión es debida principalmente al alto contenido de cromo, el cual forma una capa tenaz y pasiva de óxido de cromo. Originalmente, las aleaciones de CoCrMo fueron adoptadas para aplicaciones dentales, pero sus características lo han convertido últimamente en un candidato ideal para superficies de contacto metal-metal en implantes ortopédicos, siendo actualmente empleado para las articulaciones del cuerpo y para las aplicaciones de fijación de fracturas. A pesar de que el contacto metal-metal en implantes ortopédicos asume el riesgo de filtrar al torrente sanguíneo partículas diminutas de metal a causa del desgaste, por tanto, actualmente se empiezan a reemplazar por implantes basados en cerámica. La resistencia al desgaste del CoCrMo es fuertemente dependiente del porcentaje de sus elementos y de las partículas de carburo, especialmente en el tamaño, forma y distribución. Otra consideración importante es el tamaño del grano de la microestructura, donde se desea un tamaño de grano fino que consiente la obtención de una mejor tracción y mejores propiedades de fatiga.

El proceso de fabricación utilizado, en las aleaciones de CoCrMo, influye fuertemente en las características obtenidas, por lo tanto, se debe controlar cuidadosamente el proceso para lograr una pieza con la calidad deseada. Inicialmente se utilizaba la fundición para obtener las prótesis de CoCrMo, sin embargo, el forjado genera un tamaño del grano más fino y mejor microestructura, de este modo, actualmente se está utilizando el forjado y el mecanizado para obtener las piezas de CoCrMo debido a un mejor acabado superficial y sus excelentes propiedades para su utilización en prótesis (Metcalf et al., 2004).

La composición de la aleación de CoCrMo que se utiliza en este experimento es analizado mediante la iteración de 3 análisis de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDX). El EDX es una técnica analítica utilizada para el análisis elemental o caracterización química de muestras. Se basa en la investigación de una interacción de una fuente de rayos X y una muestra de excitación. La caracterización de la muestra es debido al principio fundamental de que cada elemento tiene una estructura atómica única y permite, a partir de la estimulación, que un electrón salga de su nivel estable y a través del espectrómetro de energía dispersiva definir el elemento de la muestra medida. Por este motivo, el proceso EDX determina de forma semicuantitativa el porcentaje en peso de los distintos elementos presentes (Figura 3.6).

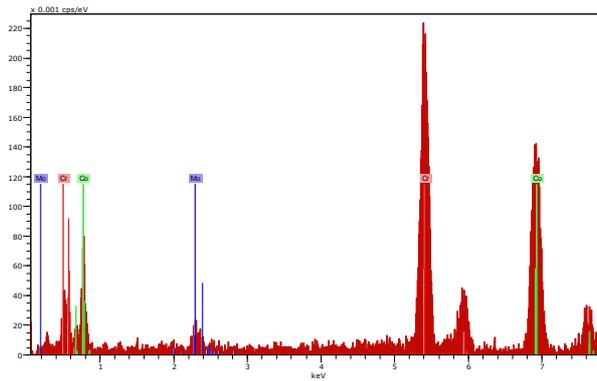


Figura 3.6: Análisis EDX de la aleación CoCrMo

Los elementos de la aleación resultantes son 31,62% de cromo (Cr), 8,14% de molibdeno (Mo) y el balance de cobalto (Co). Según el proveedor el material teóricamente debe estar conformado entre el 26-30% de Cr, un 5-7%Mo, tal como muestra en la Tabla 3.3.

Material	Cobalto	Cromo	Molibdeno	Otros
Análisis	60,24	31,62	8,14	NC
Según fabricante	Balance (59-65)	26-30	5-7	4

Tabla 3.3: Análisis mediante EDX de la aleación utilizada

La geometría y dimensión de las partículas de polvo son predominantemente esféricas con un diámetro entre 20 y 50 micras (Figura3.7). El polvo tiene unas pequeñas partículas adheridas conocidas, como satélites, las cuales son propias del proceso de obtención del polvo y poseen la misma composición que el material metálico, pero con una menor dimensión.

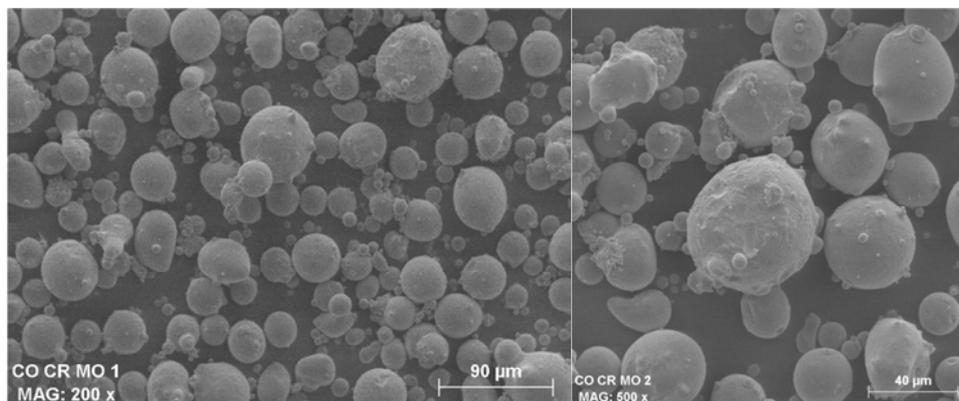


Figura 3.7: Geometría y dimensión del CoCrMo utilizado. Magnificación: a)200x b)500x

La preparación del polvo fue realizada por Metallied Powder Solutions, mediante atomización en estado líquido, donde el metal fundido se vierte a través de un embudo refractario en una cámara de atomización, haciéndolo pasar a través de chorros de agua pulverizada, consiguiendo así obtener el tamaño del polvo. De este modo, el porcentaje de la aleación del polvo viene determinado por el porcentaje de la aleación del material fundido.

La pre-deposición de la capa de polvo se debe realizar mediante la adición del CoCrMo en la plataforma de construcción, en este caso, en el plano inclinado. La capa de polvo va desde las 40 hasta las 500 micras, este grosor de capa es definido por la capa de polvo repartida en la superficie del plano inclinado.

La plataforma puede recibir, según los parámetros utilizados, la incidencia del haz láser a través de la afectación térmica. Este proceso conocido como HAZ, cambia la microestructura del material de la plataforma y también puede llegar a fundirla, dando lugar en la base de una mezcla del material de la plataforma con la del polvo fundido, es decir, hay una deposición de material en el sustrato. Este proceso de densificación ayuda a que el cordón fundido quede bien sujetado a la superficie.

La mayoría de aleaciones de CoCrMo tienen una temperatura de fusión entre los 1623°K y 1703°K, el cual varía según los porcentajes de cada elemento. En la Tabla 3.4 se muestran las temperaturas de fusión de cada uno de los componentes del polvo y de la placa.

Material	T° de fusión [K]	T° de evaporización [K]	Porcentaje [%]
Cobalto	1768	3200	60
Cromo	2130	2945	32
Molibdeno	2896	4912	8
AISI 1045	1643	-	-

Tabla 3.4: Temperatura de fusión y evaporización del Co, Cr y Mo. Fuente: (Perry, 1999)

3.4 Experimentación

En la experimentación se han formado 80 cordones que conforme el diseño de experimentos, cada uno de ellos varía de potencia y velocidad de escaneo para crear una línea única de cordón fundido dentro del plano inclinado. Los experimentos (Tabla 3.5) se

agrupan en 4 familias de velocidades y cada familia contiene 20 potencias distintas. La trayectoria del láser funciona en un solo sentido a lo largo de los 230 mm dirección y va desde las 40 hasta las 500 micras, por lo que durante su trayectoria de retorno, el láser está parado y se asume que la placa se enfría y se descarten acumulaciones de calor.

Exp.	P	SS	Exp.	P	SS	Exp.	P	SS	Exp.	P	SS
1	25	83,3	21	25	66,6	41	25	50	61	25	33,3
2	50	83,3	22	50	66,6	42	50	50	62	50	33,3
...	...	83,3	66,6	50	33,3
19	475	83,3	39	475	66,6	59	475	50	79	475	33,3
20	500	83,3	40	500	66,6	60	500	50	80	500	33,3

Tabla 3.5: Orden de los experimentos

Durante la experimentación no se realiza una aleatorización de los experimentos, para evitar que haya una influencia en los resultados. Por lo tanto, los experimentos se realizan en orden, y entre experimentos se deja un tiempo de pausa que permite a la placa como al propio polvo vuelvan a la temperatura inicial y consecuentemente, que la temperatura no influya en la absorción de la energía.

El experimento se realiza encendiendo el láser dentro de la placa de fabricación, sin entrar en contacto con el polvo inmediatamente, posteriormente se realiza el escaneo en la placa siguiendo el eje X hasta completar toda la extensión del cordón. El láser sobresale 10 mm del último punto donde hay polvo, y una vez que está incidiendo en la plataforma se procede a la interrupción del láser. Este procedimiento se realiza debido a la carencia de conexión entre el control numérico del centro de mecanizado vertical con el sistema del láser.

Una vez realizado el experimento, se procede a la limpieza de la placa de construcción que contiene el plano inclinado. Para la limpieza se utiliza una brocha que elimina todo el polvo que no se ha fundido, que no ha recibido la energía del láser, o el polvo que ha recibido la energía del láser pero que no ha conseguido pegarse a la plataforma. Una vez eliminado todo el material sobrante, se obtiene una plataforma de construcción con las distintas líneas (Figura 3.8), dentro de la cual se pueden diferenciar claramente las 4 familias de velocidades y en cada una de ellas la variación de las distintas potencias. Debido a que algunos de los niveles de potencia utilizados no son suficientes para fundir el material, no se logran observar las 20 potencias en cada uno de los niveles de velocidad.

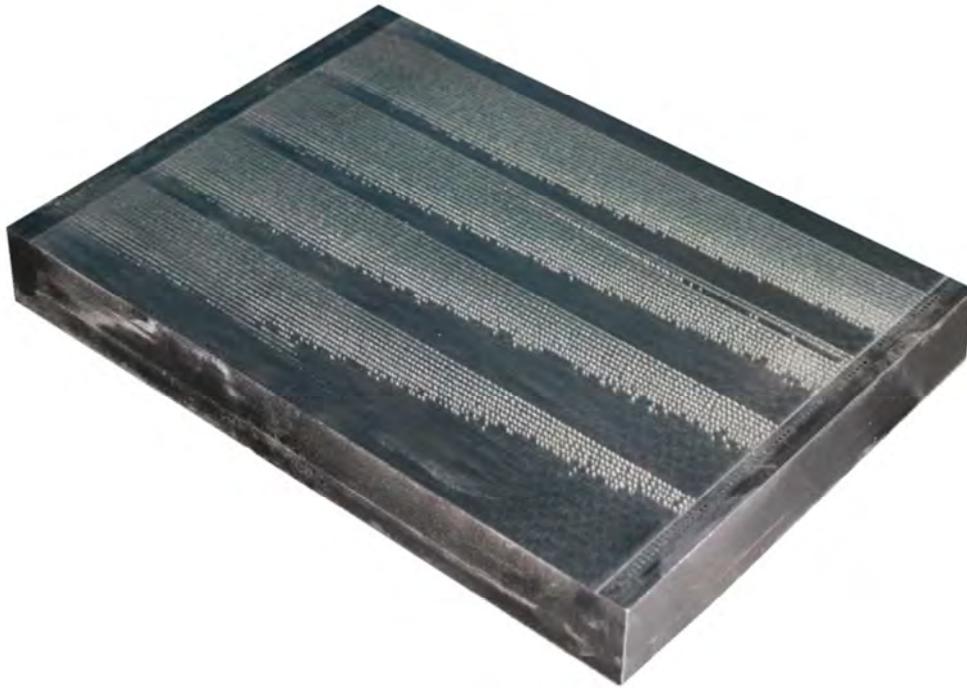


Figura 3.8: Resultado de la placa después de la experimentación.

3.5 Preparación de las muestras

La preparación de las muestras se realiza con el objetivo de evaluar morfológicamente el cordón, además de analizar sus propiedades mecánicas, como la microdureza, y las propiedades físicas como la porosidad. Para realizar estos análisis es necesario cortar los cordones perpendicularmente a la dirección de escaneo, es decir, realizar un corte perpendicular a la dirección del movimiento del láser.

3.5.1 Corte de las piezas

Primeramente se realiza una eliminación de 5 mm de espesor de la placa de construcción, que inicialmente es de 30mm. La eliminación del material es mediante fresado y sirve para adaptar la dimensión de las muestras al molde de infiltración.

Además de reducir el espesor, se realizan 10 cortes transversales en la placa mediante electroerosión por hilo (WEDM). La electroerosión es un proceso de fabricación por descarga eléctrica donde se genera un arco eléctrico, entre la pieza y el hilo, arrancando así las partículas de la pieza hasta abrir un canal. Los cortes (Figura 3.9) se han realizado en 10

posiciones de grosor de capa: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 micras. En estos cortes se realiza el análisis morfológico del cordón. Cada una de las muestras se identifica de acuerdo al grosor de capa y niveles de parámetros del proceso asociados.

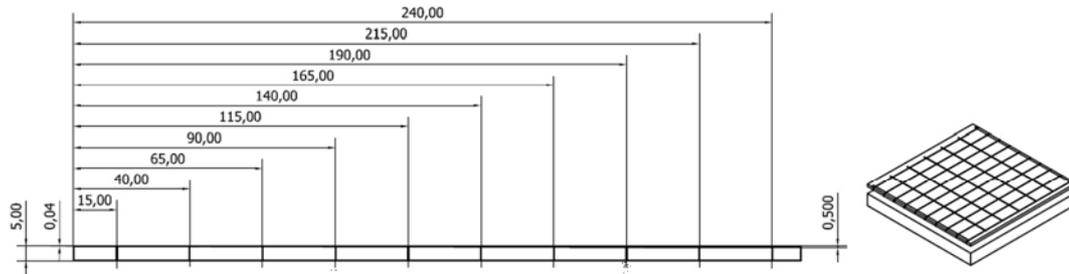


Figura 3.9: Cortes realizados mediante EDM.

3.5.2 Montaje en resina

Una vez cortada la placa, se limpian las muestras con agua y jabón para eliminar las partículas de suciedad y grasa que pueda contener debido al proceso de corte. Esta limpieza se realiza mediante una máquina de ultrasonido (Figura3.10a), la cual además de limpiar nos permite mejorar el agarre una vez que se monta en la resina. Las muestras son introducidas en un molde de silicona donde se rellena de resina epoxi RSF 816 de la marca Axson con el catalizador, la resina tiene un tiempo de curado de 24h y la polimerización se realiza a baja temperatura, entre 25 y 70°C, anulando una afectación térmica en la muestra. Las muestras se infiltran (Figura3.10b) para tener un mejor control y manejo de las piezas en pulido, microscopia y análisis morfológico.



a)



b)

Figura 3.10: a) Limpieza por ultrasonido b) Inclusión de las muestras en resina

3.5.3 Pulido

Una vez montadas todas las muestras, se realiza el pulido de la superficie a observar. El proceso de pulido nos sirve para poder observar la superficie de forma que sea totalmente plana y diferenciar a través del microscopio cada una de las partes (substrato y cordón), permitiendo además que toda la superficie quede bien enfocada. El mismo proceso nos ayuda a eliminar posibles modificaciones en el material, debido efectos térmicos provocados por el proceso de electroerosión, eliminando a través del pulido una capa de micras de material que pudo ser afectado durante el proceso.

Durante el pulido se utilizan dos tipos de elementos abrasivos, los cuales se diferencian según el material, en el primer caso, se ha utilizado un papel de carburo de silicio y en el segundo, partículas de alúmina. El papel abrasivo de carburo de silicio, también conocido habitualmente como papel de lijar, tiene distintas granulometrías que van por orden según el número de granos por pulgada cuadrada, empezando por 80 hasta 2000 granos (Tabla 3.6). Este proceso se realiza con una máquina de pulir que tiene una velocidad de rotación de 250 rpm y utilizando un sistema de refrigeración mediante agua. El tiempo de esta primera fase depende de la presión que se ejerce en las muestras, la cual se debe ir puliendo hasta eliminar cualquier ralladura del papel abrasivo anterior. La fuerza aproximada que se aplica es de 27N. El segundo proceso es mediante una máquina de lapear, donde se utiliza una máquina que elimina las ralladuras que se obtienen en el papel más fino (2000 granos por pulgada) mediante paños con distintos tamaños de partícula de alúmina (Tabla 3.6), esto permite obtener una superficie con una alta reflectividad (acabado espejo). La velocidad de rotación de esta última máquina es de entre 100-150 rpm y se debe aplicar una fuerza similar a la primera etapa. Durante el proceso de preparación de la muestra se debe considerar como importante el no avanzar a lijas o paños más finos si no se ha corregido el plano ya que esto puede provocar que no se observe correctamente la superficie, ya sea por la generación de más de un plano de trabajo o bien por la presencia de ralladuras.

Proceso	Material	Dimensión	Tiempo
Papel abrasivo	SiC	80, 220, 400, 800, 1200 y 2000 grano/pulgada ²	Hasta nivelar
Paño de pulido	Alúmina	9 micras	5:00
Paño de pulido	Alúmina	3 micras	5:00
Paño de pulido	Alúmina	1 micra	3:00

Tabla 3.6: Material para el pulido

3.6 Parámetros de salida

Los parámetros de salida son los distintos parámetros que se analizan posteriormente de realizar la experimentación. Estos parámetros se pueden ver influenciados por los parámetros de entrada, ya sea individualmente o bien, a través de una interacción entre ellos. En la Figura 3.11 se pueden observar los parámetros de entrada utilizados y los parámetros de salida analizados.



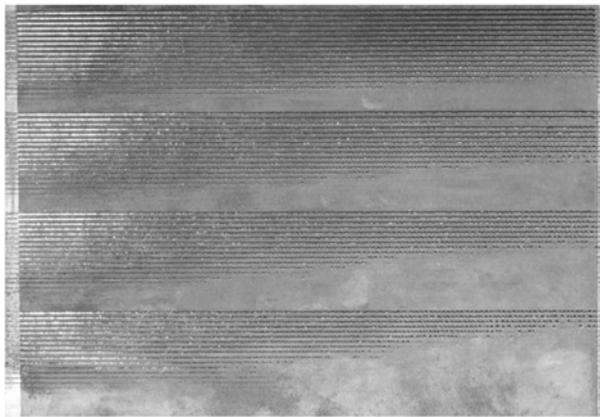
Figura 3.11: Parámetros de entrada y de salida.

El análisis de las variables escogidas permite poder definir la zona de fabricación, teniendo en cuenta la calidad y morfología del cordón, o bien, escoger dentro de los parámetros de fabricación aquellos que nos den las mejores propiedades en nuestra pieza, ya sea la densidad, dureza o incluso la microestructura obtenida en el cordón.

3.6.1 Continuidad del cordón

Antes de realizar los distintos cortes con el proceso de electroerosión, se realiza un análisis de cada uno de los cordones del experimento. En este caso, observando la placa, se puede ver que no se encuentran 80 experimentos (Figura 3.12) cumplidos debido a que ciertos niveles de los parámetros utilizados no han permitido crear un baño fundido suficiente para conseguir una adhesión suficiente a la base o simplemente no se consiguió la fundición completa del polvo, en ambos casos, durante la limpieza estas partes son eliminadas.

En la tabla resumen de la Figura 3.12, se indica el nivel mínimo y máximo que se ha obtenido durante la experimentación, y entre paréntesis, se muestra el número de cordones existentes una vez se ha cortado la placa. Este resumen nos permite tener una idea de la cantidad de experimentos que se han perdido debido a una fundición y adhesión incompleta del material.



	Nivel mín.	Nivel máx.
SS	33,3 (121)	83,3 (33)
P	125 (1)	500 (32)
LT	50 (47)	500 (9)

Figura 3.12: Resultado de la experimentación del plano inclinado después de la limpieza.

Basados en un análisis cualitativo de la apariencia, dentro de los experimentos se encuentran distintas calidades del cordón, las cuales se pueden dividir en 4 grandes categorías: continuo, discontinuo, formación de bolas y ausencia de cordón (Yadroitsev et al., 2012). Cada uno de los experimentos presenta como mínimo uno de los comportamientos, aunque igualmente se pueden encontrar experimentos que contengan los 4 comportamientos a lo largo del cordón. A continuación se define cada una de las categorías definidas:

- Continuo: el perfil o camino visible tiene una apariencia de cordón continuo, esto supone que a lo largo del cordón el ancho del cordón es constante. Es posible que a lo largo del cordón aparezcan pequeñas bolas incrustadas (Figura 3.13) que son exactamente igual al efecto bola pero en una menor escala. Tal como explica Li (Li et al., 2012), éstas bolas no afectan en la repartición de polvo de la siguiente capa y por lo tanto, no son consideradas perjudiciales en el proceso.

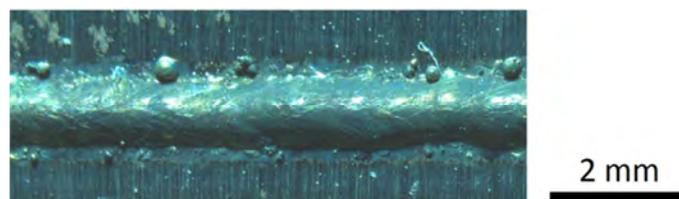


Figura 3.13: Cordón continuo.

- Discontinuo: cuando se analiza el cordón desde una perspectiva superior, se puede observar que en el eje longitudinal del cordón una interrupción en la continuidad del cordón, obteniendo así distintas anchuras (Figura 3.14) y una del efecto bola.

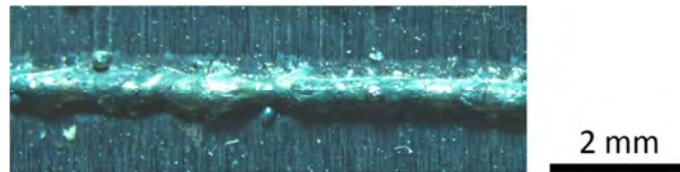


Figura 3.14: Cordón discontinuo.

- **Efecto Bola:** es la obtención, tal y como determina su nombre, de una línea que en lugar de ser constante está caracterizada por la formación de unas esferas (Figura 3.15). La diferencia entre estas bolas y las que se obtienen en el cordón continuo son la dimensión de las mismas, en este caso, el diámetro de las bolas es aproximadamente el ancho del cordón.

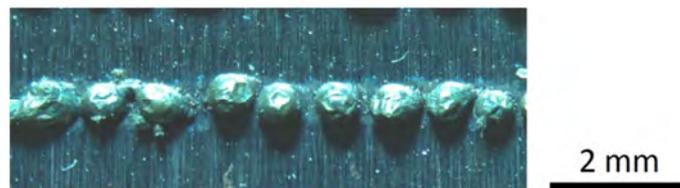


Figura 3.15: Cordón con el efecto bola.

- **Sin cordón:** son las zonas de la placa donde no existe cordón, por lo tanto, se puede observar la superficie de la plataforma sin la adición de material (Figura 3.16). En algunos casos, se puede observar la trayectoria del láser debido a la afectación del material a consecuencia de la temperatura en la superficie.

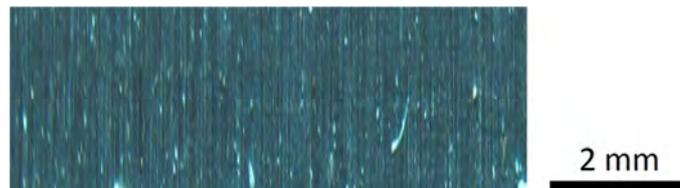


Figura 3.16. Placa sin cordón

De los experimentos que han quedado en la placa, se ha determinado la distancia, y por lo tanto el grosor de polvo, de cada una de las tres primeras categorías, de este modo, pudiendo analizar la relación entre los parámetros de entrada y la continuidad del cordón. En cada una de las 4 familias de velocidades de escaneo, se ha graficado una línea de continuidad del cordón (Figura 3.17a), de esta forma, se logra obtener un límite de continuidad del cordón para cada una de las potencias y velocidades experimentadas (Figura 3.17b) dado un grosor de capa. En el caso de las velocidades bajas, únicamente se han

graficado aquellos valores de grosor de capa que no sobrepasan las 500 micras, es decir, en el caso de la ausencia de continuidad en el cordón.

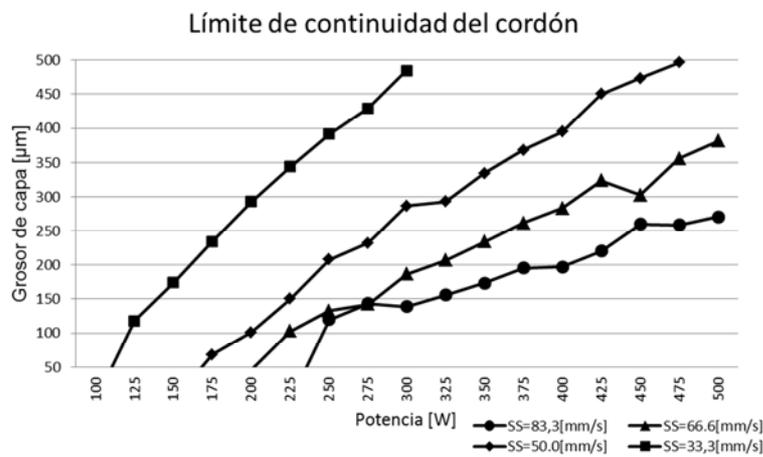
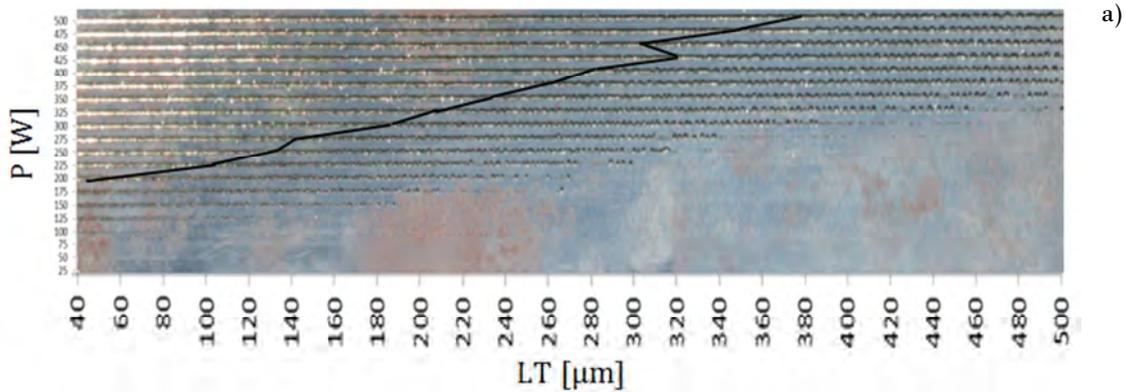


Figura 3.17. Límite de continuidad del cordón a) en la placa (SS=6677mm/s) b) graficado. Fuente: (Delgado et al., 2012b)

Además, se realiza un análisis del efecto de los parámetros de potencia y velocidad de escaneo sobre el límite del grosor de capa para la formación continua del cordón (Figura3.18). La potencia es directamente proporcional a la altura límite de polvo mientras que la velocidad es indirectamente proporcional, es decir, a mayor potencia y a menor velocidad de escaneo es posible fundir una mayor capa de polvo (Ciurana et al., 2012).

Asimismo, es posible calcular el efecto de la potencia y la velocidad de escaneo sobre la altura de capa de polvo y conocer cuál es la ecuación que permite relacionar estos parámetros. Según el valor p de la ecuación de constantes, con un nivel de confianza del 95%, la ecuación (Ecuación 3.2) derivada experimentalmente dentro del rango de los parámetros analizados demuestra que una influencia superior de la velocidad de escaneo sobre la potencia.

Ecuación 3.2

$$LT \max = 0.0017 \cdot P - 0.0031 \cdot SS - 8.883 \cdot 10^{-6} P \cdot SS + 0.0871$$

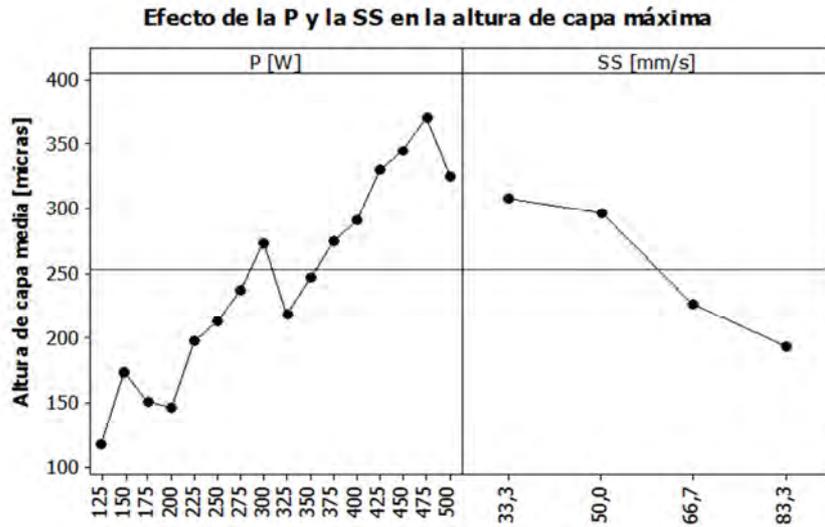


Figura 3.18: Efecto de la potencia y la velocidad de escaneo sobre la LT_{max}

Además, cada una de las posiciones de la plataforma de construcción se puede trasladar a valores de densidad de energía, la cual, representa la cantidad de energía que se ha suministrado al polvo por unidad de volumen, por este motivo, en cada experimento se detecta un límite de continuidad del cordón, y una combinación de los 3 parámetros: potencia (P), velocidad de escaneo (SS) y grosor de capa (LT), los cuales permiten calcular la densidad de energía (E_d) mediante la Ecuación 3.3 (Wang et al., 2012). Al realizar únicamente un cordón simple en cada nivel experimental, no existe otra energía del láser que la que se distribuye a través del diámetro del láser (ϕ_l).

$$E_d = \frac{P_L}{LT \cdot SS \cdot \phi_l}$$

Ecuación 3.3

En este sentido, se pueden graficar los distintos valores de densidad de energía por cada uno de los experimentos realizados, sin embargo, los valores de densidad de energía más importantes se presentan cuando hay un cambio del comportamiento del cordón y, por lo tanto, se evoluciona de un cordón continuo a un cordón discontinuo. Los valores de densidad de energía (Figura 3.19) corresponden los parámetros de potencia y velocidad de escaneo que permiten fundir el máximo grosor de capa, por lo tanto, determina la densidad de energía mínima necesaria para obtener un correcto cordón. Los cordones continuos que se han creado íntegramente, se han desechado debido a que no se conoce la altura donde hay el cambio en la morfología del cordón y, consecuentemente, no se puede calcular la densidad de energía mínima necesaria.

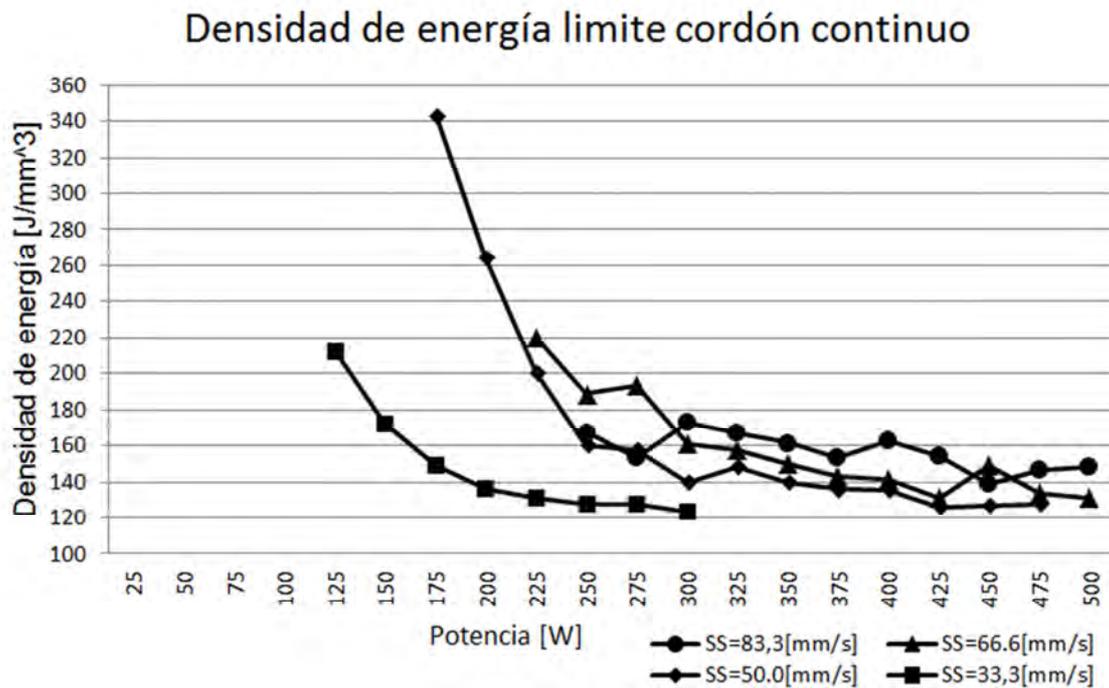


Figura 3.19. Densidad de energía para límite de cordón continuo

Como se puede observar en la gráfica, a medida que va aumentando la potencia, la densidad de energía tiene una tendencia de ir reduciéndose hasta estabilizarse entre valores de 120 y 160 J/mm³. En el caso de utilizar potencias más elevadas por una misma velocidad de escaneo, es decir, sobrepasando la densidad de energía mínima se obtiene un cordón continuo, pero se puede presentar la evaporación del material debido a la alta temperatura que se alcanza.

Si se utiliza la media de los valores encontrados por cada uno de las distintas velocidades y se elimina en cada velocidad aquellos valores que se desvían ± 3 veces la desviación estándar, todas las medias de las densidades mínimas están en un rango entre 153 y 158 J/mm³, para cada una de las velocidades. Si se asume que la densidad mínima necesaria para poder fundir el CoCrMo es 155 J/mm³, entonces se puede saber mediante la Ecuación 3.4 los valores de los parámetros.

$$155 \leq \frac{P}{LT \cdot SS \cdot 0,15}$$

Ecuación 3.4:

3.6.2 Perfil

Una vez eliminados todos aquellos parámetros que limitan la creación de un cordón continuo, se empieza a analizar los distintos perfiles, de este modo, se observaron las características geométricas para cada uno de los parámetros analizados, es decir, la potencia,

la velocidad de escaneo y la altura de capa. En esta ocasión el análisis de la altura de capa no es continuo, sino que mediante la preparación de la muestras, como se ha mostrado en el apartado anterior, se realizan los cortes en los grosores de la capa a 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 micras.

Los aspectos geométricos (Figura 3.20) más relevantes del cordón analizados son el ángulo de contacto (α_1 y α_2), la altura del cordón (h_1), anchura del cordón (w_1), la profundidad de penetración (h_2), el área del cordón (total, cordón y penetración) y la velocidad de construcción, tal y como lo estudia Yadroitsev et al. (Yadroitsev et al. 2012). De este modo, se puede observar cómo afectan los parámetros en cada una de las características dimensionales y geométricas del cordón y poder encontrar los valores de los parámetros para obtener un cordón ideal, y en un futuro, conocer la distancia entre dos líneas de escaneado para que el solapamiento del cordón sea el adecuado.

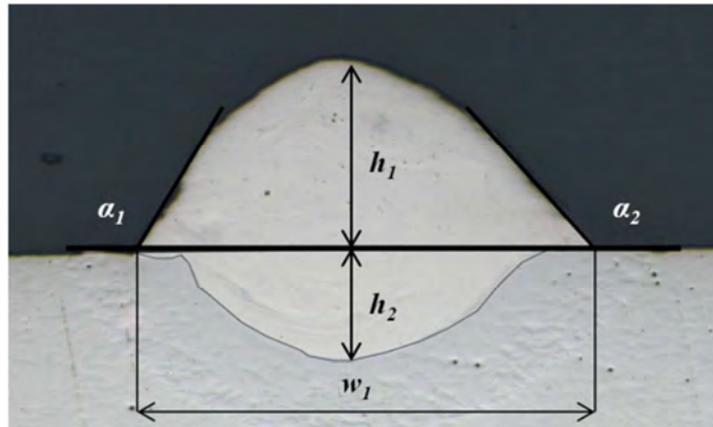


Figura 3.20. Aspectos geométricos analizados en la observación del perfil

Para analizar el efecto de cada uno de los parámetros y sus interacciones se realiza un análisis de la variancia (ANOVA). Las suposiciones asumidas durante el análisis del perfil son el utilizar solo los datos de los cordones continuos y un ajuste de grados de libertad debido a un ANOVA desbalanceado dada la falta de datos en los cordones no continuos. Los ajustes de los grados de libertad se realizaron mediante el software estadístico Minitab 14. Se realizó el mismo ajuste (Tabla 3.7) durante el análisis de todos los parámetros.

Ángulo de contacto	LT	SS	P	LT·SS	LT·P	SS·P	LT·SS·P	Error	Total
F	9	3	15	27	135	45	405	-358	281
af	9	3	15	19	97	32	42	64	281

Tabla 3.7: Ajuste de los grados de libertad ANOVA

Durante el análisis de varianza, los parámetros o interacciones de los parámetros que tienen una influencia significativa en los parámetros de salida vienen determinadas por el valor P. Los valores por debajo de 0,05 (error del 5%) son significativos para la salida analizada.

Para obtener los valores de la geometría del cordón, inicialmente se giró la imagen hasta conseguir que el plano de la plataforma fuera horizontal, de esta forma, todas las mediciones de las alturas y anchuras se realizan en función a la referencia del plano de la plataforma. Para calcular la geometría de los cordones se realizó un escalado de las imágenes conforme a los aumentos utilizados en el microscopio y después se evaluaron las medidas con AutoCAD®.

3.6.2.1 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto se define como el ángulo que forma la plataforma de fabricación y el cordón, por este motivo, en la fabricación de una línea simple o múltiple, también nombrado como capa, se obtiene dos ángulos de contacto (α_1 y α_2), es decir, un ángulo por cada lado de cordón. Estos dos ángulos de contacto definen la adhesión y mojabilidad del cordón fundido.

El ángulo de contacto óptimo, teniendo en cuenta que el proceso no consta únicamente de realizar una simple línea y que, además, se debe realizar la superposición de otras capas de polvo es de 117° (Hirata et al., 2009). Este ángulo permite que por una misma separación del láser y un mismo tamaño del cordón, la sobreposición del cordón sea mayor y, además, la altura del cordón sea máxima (Figura 3.21). De esta forma, los dos cordones quedan unidos con un solapamiento mayor y un área de valle mínima, ayudando a la conexión entre capas y a disminuir el tiempo de fabricación debido a la utilización de una menor cantidad de capas.

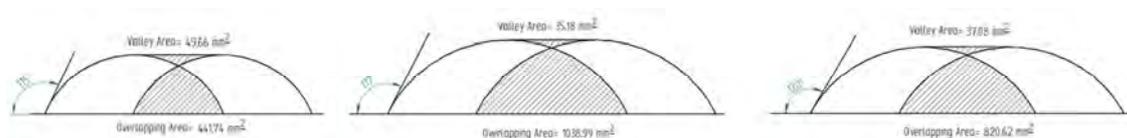


Figura 3.21: Comportamiento del cordón según el ángulo de contacto

Existen multitud de factores que pueden modificar el ángulo de contacto, entre otros las propiedades del propio material (viscosidad, temperatura, etc.), parámetros del proceso e incluso factores ambientales. En el análisis presente del ángulo de contacto en el perfil, se pretende estudiar el comportamiento entre los distintos parámetros de entrada (altura de capa, velocidad de escaneo y potencia), para saber cuál es la influencia de cada uno de los parámetros e interacciones en el ángulo de contacto formado. Para el análisis del ángulo de contacto, se ha realizado una media de los dos ángulos (α_1 y α_2) ya que, en teoría, estos dos

ángulos deben ser iguales en ambos lados debido a la simetría del experimento. Si se realiza un solapamiento de cordones, el experimento pasa a ser asimétrico porque se tiene por un lado un cordón fundido y en el otro, únicamente polvo.

El análisis ANOVA del ángulo de contacto (Tabla 3.8), indica una influencia significativa de la velocidad de escaneo y el grosor de capa de polvo. Observando los resultados obtenidos, la interacción entre la velocidad de escaneo y el grosor de la capa de polvo, también es crítica para el ángulo de contacto.

Ángulo de contacto	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	155906,5	17322,94	52,49	$3,72 \cdot 10^{-26}$
SS	3	4462,1	1487,36	4,51	0,0062
P	15	6422,5	428,17	1,30	0,23
LT·SS	19	27377,7	1440,93	4,37	$4,45 \cdot 10^{-6}$
LT·P	97	16149	166,48	0,50	0,999
SS·P	32	6839,8	213,74	0,65	0,910
LT·SS·P	42	6640,5	158,11	0,48	0,994
Error	64	21119,9	330		
Total	281	244918	21547,74		

Tabla 3.8: ANOVA del ángulo de contacto

Para observar el comportamiento de cada uno de los parámetros de forma individual se realizó un análisis de los efectos principales para el ángulo medio de contacto (Figura 3.22). Como se puede observar y corroborando los resultados del ANOVA, el comportamiento de la velocidad de escaneo y la potencia no tiene un efecto significativo a comparación con el comportamiento de la altura de capa.

La altura de la capa de polvo tiene una influencia en el ángulo de contacto debido a que a menor altura de polvo, el láser tarda menos tiempo en atravesar y llegar a la plataforma de construcción y entonces el baño de material fundido se distribuye en la superficie de forma más rápida y empieza a formarse en las capas superiores. Por lo tanto, a medida que la capa y la piscina de baño fundido va aumentando el ángulo de contacto disminuye (Figura3.22).

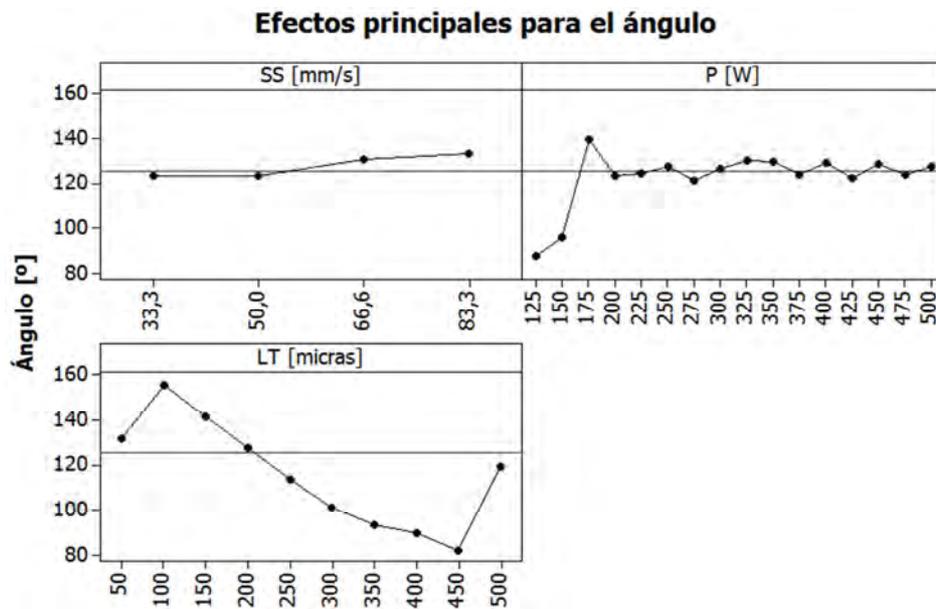


Figura 3.22: Efectos principales para el ángulo del contacto

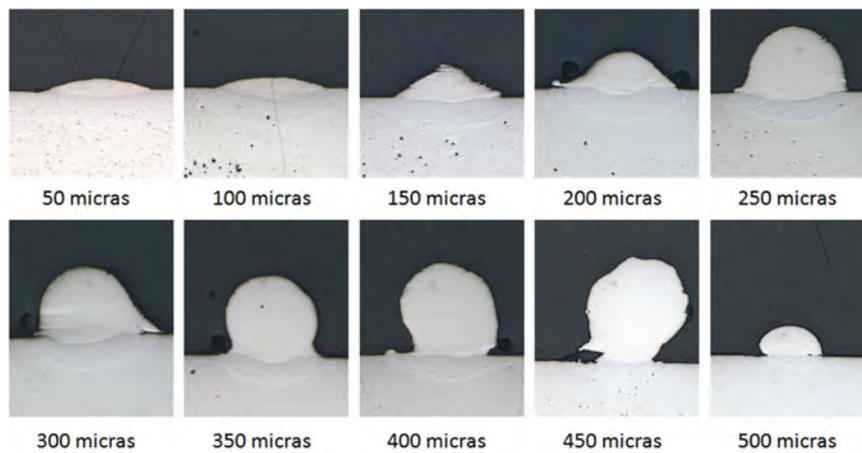


Figura 3.23: Ángulo cambiando únicamente la altura de capa. P= [275 W] SS= [33,3 mm/s]

Existe una máxima altura de la capa para ciertos parámetros de potencia y velocidad de escaneo utilizados durante el experimento, de forma que se provoca la presencia del efecto bola. Como se puede observar en el perfil a 500 micras, el cordón disminuye bruscamente y se ha modificado completamente la tendencia de los anteriores grosores. Además, se debe observar que aunque se tenga un cordón continuo, se debe tomar en consideración la adherencia y la disminución en el ancho del cordón. El comportamiento cambiante del efecto de la capa de polvo en los extremos del experimento puede ser debido a que su cercanía del límite del plano inclinado y, por consiguiente, de una pared vertical,

modificando así el comportamiento. Aunque se trata de minimizar el efecto del láser antes y después del movimiento, este puede modificar el ángulo de contacto debido al cambio de viscosidad.

3.6.2.2 Altura cordón

La altura de cordón se define como la distancia máxima que existe entre el punto más alto del cordón y la superficie del plano inclinado, de forma que, esta distancia sea perpendicular a este. Por este motivo, antes de calcular la altura del cordón se realiza un ajuste en la rotación de la imagen para que el plano de la plataforma sea la superficie de referencia.

En el ANOVA (Tabla 3.9) se obtiene estadísticamente que todos los parámetros de entrada, potencia, altura de capa y velocidad de escaneo tienen un efecto significativo en la altura del cordón y que, además, también la interacción entre la altura de la capa de polvo y la velocidad de escaneo influyen. Si se analizan los resultados más detalladamente, se puede observar que el efecto de la capa de polvo sobresale de los demás resultados, siendo el más significativo.

Altura cordón	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	5748805	638756,11	84,10	$5,32 \cdot 10^{-32}$
SS	3	494261	164753,67	21,69	$8,28 \cdot 10^{-10}$
P	15	665560	44370,67	5,84	$2,24 \cdot 10^{-7}$
LT·SS	19	677329	35648,90	4,69	$1,51 \cdot 10^{-6}$
LT·P	97	286694	2955,60	0,39	1
SS·P	32	143765	4492,66	0,59	0,947
LT·SS·P	42	145941	3474,79	0,46	0,996
Error	64	486072	7594,88		
Total	281	8648428	902047,26		

Tabla 3.9: ANOVA de la altura del cordón

Si se realiza un gráfico de los efectos principales (Figura 3.24) para la altura del cordón, se puede observar las siguientes tendencias en los distintos parámetros:

- La velocidad de escaneo es inversamente proporcional a la altura del cordón del polvo.
- La potencia tiene la tendencia de aumentar la altura del cordón con la crecida de la potencia del láser.
- La altura del cordón aumenta al aumentar la capa de polvo.

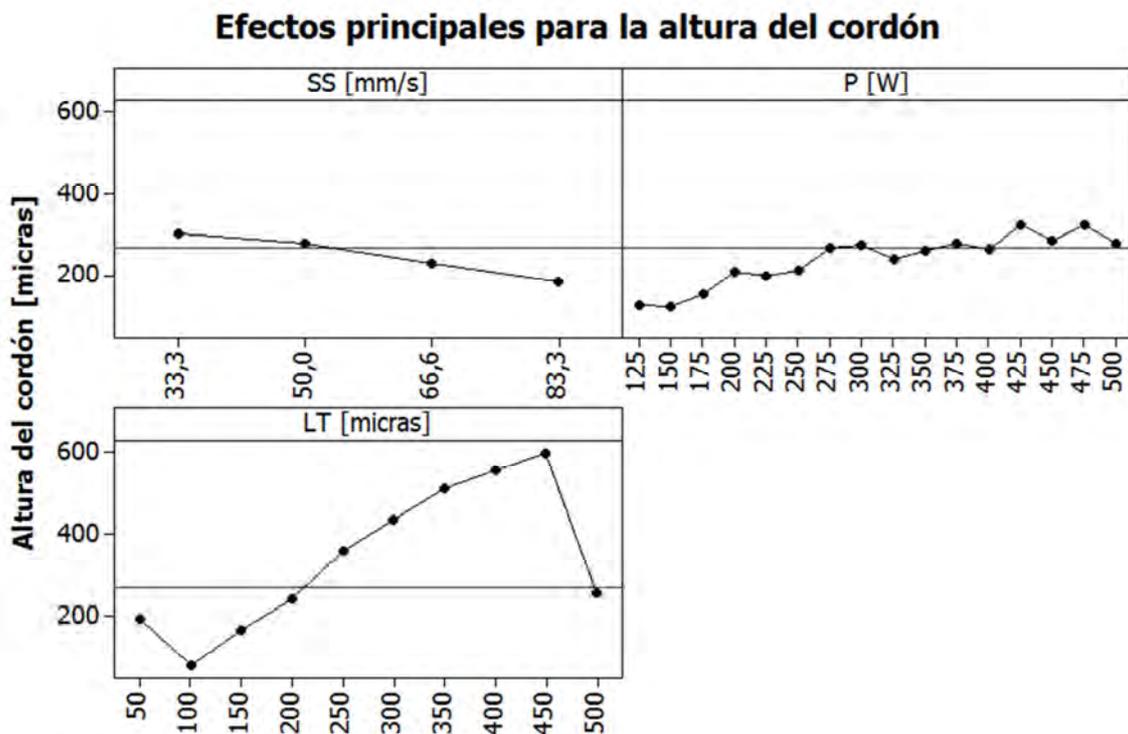


Figura 3.24: Efectos principales para la altura del cordón

De la gráfica de los efectos principales (Figura 3.24) se puede observar que el comportamiento de la altura del cordón no depende de la densidad de energía suministrada en la formación del cordón, y que ésta disminuye al aumentar la capa de polvo manteniendo los demás parámetros constantes. Por este motivo, la dificultad para crear una altura grande del cordón, recae en la altura de la capa de polvo, ya que en este caso el proceso tiene que fundir el material que tiene a su base sin necesidad de absorber el material lateral para lograr a un crecimiento en la altura del cordón.

Aunque es muy interesante conocer el comportamiento de la altura del cordón en función de los distintos parámetros, se debe tener en cuenta que la altura deseada del cordón debe ser la misma que el grosor de capa repartida a la plataforma de construcción. Para calcular el error de la altura se ha realizado mediante el error relativo. Por lo que se ha realizado un ANOVA para saber los parámetros e interacciones que tienen influencia en el

error (Tabla 3.10). Del el análisis se obtiene que el grosor de capa, la velocidad de escaneo y la interacción entre estas dos variables tienen una influencia significativa en el error, esto significa que los demás parámetros que se han analizado se pueden variar y estadísticamente no habrá una modificación significativa en el error relativo entre altura del cordón y la altura de la capa de polvo deseada.

Error altura	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	2545068	282785,33	13,94	$4,16 \cdot 10^{-12}$
SS	3	630762	210254	10,36	$1,19 \cdot 10^{-5}$
P	15	205237	13682,47	0,67	0,799
LT·SS	19	2001326	105332,95	5,19	$3,08 \cdot 10^{-7}$
LT·P	97	812004	8371,18	0,41	1
SS·P	32	582529	18204,03	0,90	0,624
LT·SS·P	42	445830	10615	0,52	0,986
Error	64	1298277	20285,58		
Total	281	8521033	669530,53		

Tabla 3.10: ANOVA del error entre la altura teórica y la obtenida

Como se puede observar en los resultados de los efectos principales (Figura 3.25), el error medio y absoluto de todos los experimentos está alrededor del 80% en el análisis de todos los cordones. Al analizar los resultados y la gráfica, se puede observar que la potencia tiene una tendencia cambiante durante los distintos valores, mientras que al aumentar la velocidad tiene una tendencia a aumentar el error de la altura.

La altura de capa de polvo además presenta un resultado anómalo a 50 micras mientras que en los otros niveles se mantiene considerablemente constante. Este fenómeno anormal puede ser debido a que este grosor se encuentra al inicio y/o borde de la plataforma de construcción, presentándose que tal vez debido a una compactación diferente en el polvo.

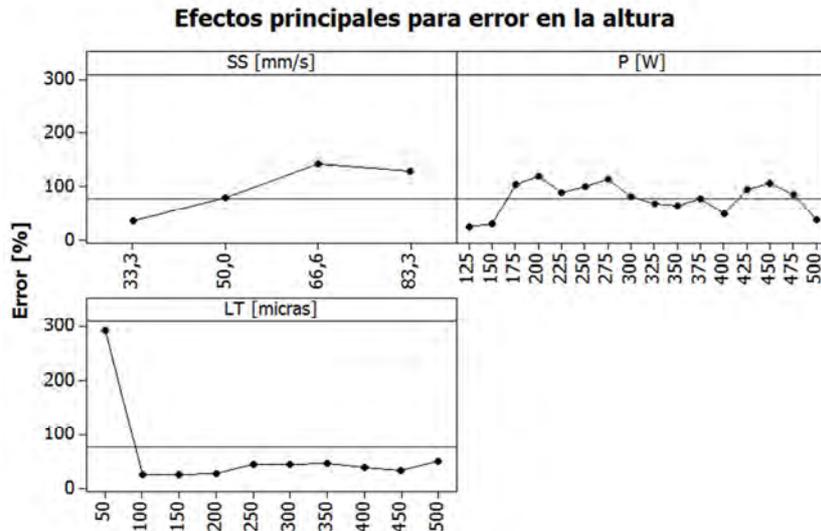


Figura 3.25: Efectos principales para el error en la altura

En el siguiente análisis, se han eliminado los dos extremos de la capa de polvo, de este modo, se emplea únicamente las alturas de capa entre 100 a 450 micras y se elimina los posibles efectos de la cercanía al límite del plano inclinado. Los resultados del ANOVA continúan mostrando que la influencia recae en los mismos parámetros principales e interacciones. Como se puede observar en la Figura 3.26, la influencia de la velocidad está muy cerca de no tener influencia, lo mismo acontece con el parámetro de la potencia. Además, el comportamiento se ha modificado ampliamente, pasando de un error medio del 80% a un error promedio del 32%. Este resultado afirma que los extremos del plano inclinado significan un ruido considerable en el experimento.

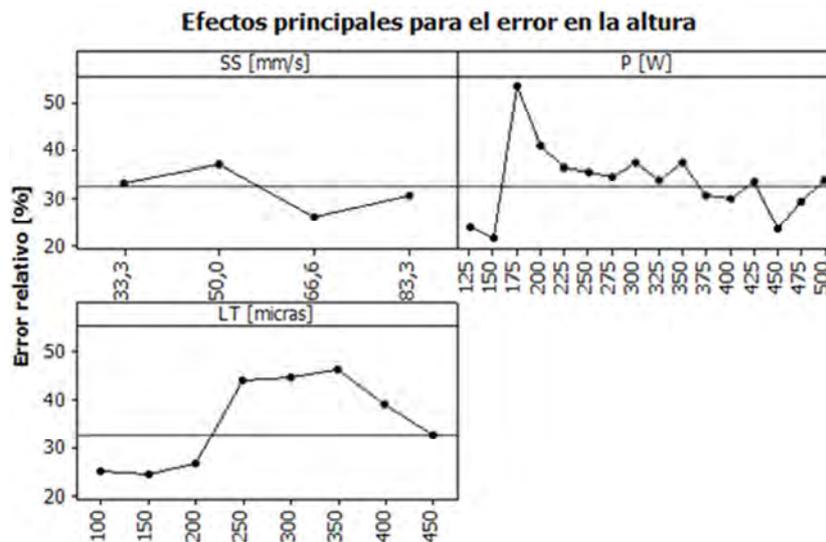


Figura 3.26: Efectos principales para el error relativo de la altura. LT=100 a 450 micras

Igualmente, en los resultados se muestra el error en la altura de forma absoluta, esto nos permite tener conocimiento de los errores que se están cometiendo, pero no si cordón está por debajo o por encima de la altura deseada, por este motivo, se efectúa el mismo estudio pero en este caso teniendo en cuenta el signo del error (Figura 3.27). Por lo tanto, los valores por debajo de 0 significan que el cordón no sobrepasa a la altura nominal y, por lo contrario, los valores por encima de 0 significan que el cordón es superior al valor nominal. Igual que el caso anterior, el cálculo de la ANOVA da que los parámetros que tienen una influencia son los mismos que en los demás análisis.

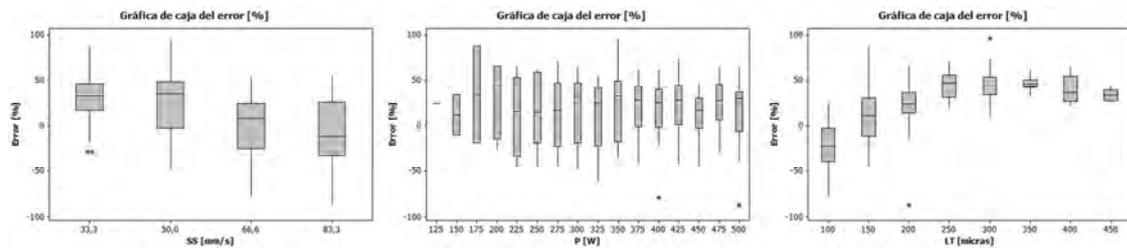


Figura 3.27: Efectos principales para el error relativo de la altura. LT=100 a 450 micras

En este análisis de diagrama de cajas se recoge el signo del error relativo, por lo tanto, nos muestra los valores atípicos (*), el límite del tercer cuartil en la parte superior, la mediana, el primer cuartil en la parte inferior y los máximos y mínimos obtenidos (límite de las líneas verticales). Si se tiene en cuenta la metodología de fabricación en SLM, la altura del cordón no debe superar por mucho el límite de la capa ya que al esparcir la siguiente capa de polvo, el repartidor podría impactar con el cordón.

Para evitar problemas en la fabricación de piezas en fundición y evitar los problemas de contacto entre el repartidor y la pieza, se deben utilizar unos valores altos de velocidad de escaneo y una baja altura de capa, ya que la potencia no tiene un efecto en la altura del cordón.

3.6.2.3 Anchura cordón

La anchura del cordón es la distancia máxima que se obtiene en la base de la plataforma, es decir, se calcula mediante la amplitud del cordón que está en contacto con la plataforma de construcción. Esta anchura debería estar alrededor del diámetro del láser, que es de 150 micras, no obstante, los resultados que se obtienen son de 2 a 5 veces el diámetro del haz láser debido a la expansión térmica del propio proceso. Este fenómeno no acontece en las máquinas comerciales debido a la diferencia de velocidad de escaneo y también a que éstas realizan el proceso en un ambiente controlado.

En el ANOVA (Tabla 3.11) se obtiene estadísticamente que los 3 parámetros principales del proceso, grosor de la capa, la velocidad de escaneo y la potencia, afectan en la

anchura del cordón, además, la interacción de los parámetros de la velocidad de escaneo con la potencia igualmente son significativos.

Anchura del cordón	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	404044	44893,78	8,79	$1,80 \cdot 10^{-8}$
SS	3	615390	205130	40,17	$1,01 \cdot 10^{-14}$
P	15	4261257	284083,8	55,63	$8,01 \cdot 10^{-31}$
LT·SS	19	143668	7561,47	1,48	0,123
LT·P	97	607497	6262,86	1,23	0,192
SS·P	32	319477	9983,66	1,96	0,011
LT·SS·P	42	179615	4276,55	0,84	0,727
Error	64	326810	5106,41		
Total	281	6857759	567298,52		

Tabla 3.11: ANOVA de la anchura del cordón

Si se analiza los efectos de los parámetros para observar los efectos de los parámetros principales (Figura 3.28), se puede observar que la potencia, al igual que el ANOVA, tiene un efecto superior a los otros parámetros. Observando la gráfica de los efectos principales, las tendencias de la velocidad y el grosor de la capa no son influyentes, y es debido a que la influencia de la potencia es muy significativa en el ancho del cordón.

Para conseguir un cordón parecido al diámetro del haz del láser se debe utilizar una velocidad de escaneo alta, una baja potencia y altura de capa. Los resultados que se obtienen son los esperados ya que al tener poca capa de material se tiene más dificultad para atraer grandes cantidades del material que está cercano al sitio de fusión, además, si se utiliza una potencia baja y una velocidad de escaneo alta, la dimensión del baño fundido disminuye debido a que la energía suministrada en el polvo es baja, disminuyendo así la temperatura y la viscosidad. No obstante, se debe crear un cordón continuo y que además se logre adherir el cordón en la plataforma de construcción. Al aumentar la velocidad de escaneo, el tiempo en que incide el láser disminuye haciendo que el enfriamiento se produzca de forma más rápida.

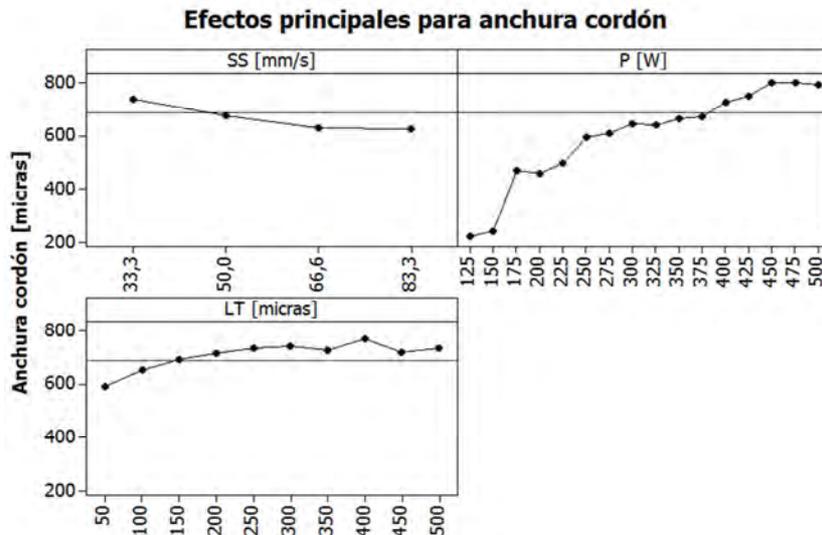


Figura 3.28: Efectos principales para la anchura del cordón

3.6.2.4 Profundidad de penetración

La profundidad de penetración es uno de los parámetros importantes en la primera capa de polvo puesto que define la profundidad de material que debe penetrar el laser en la plataforma de construcción. La profundidad de penetración, juntamente con la anchura del cordón, es de vital importancia para asegurar la buena adhesión entre la plataforma de construcción y la pieza, ya que es la única capa de unión a la plataforma.

La profundidad de penetración se ha calculado mediante la distancia máxima que existe entre el material que penetra a la base de la placa respecto a la superficie. Como se puede observar en el ANOVA (Tabla 3.12), los tres parámetros principales del proceso son significativos, además, también lo son las interacciones entre la velocidad de escaneo y la potencia y, por el otro lado, la velocidad de escaneo y el grosor de la capa de polvo.

En la Figura 3.29 se puede observar la influencia de los efectos principales. La potencia es el parámetro que tiene una tendencia más definida en la profundidad de penetración en el cordón, no obstante, la velocidad de escaneo, aun no teniendo una tendencia tan pronunciada, se observa la tendencia de ir disminuyendo la profundidad de penetración a medida que aumenta la velocidad de escaneo. Por el contrario, el grosor de capa no tiene una tendencia clara como en los otros casos, ya que se encuentra un máximo en la altura de polvo en 400 micras y de ahí comienza a disminuir la profundidad de penetración.

Profundidad penetración	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	67258	7476,1	20,25	$1,37 \cdot 10^{-15}$
SS	3	168349	56116,33	152,10	$4,58 \cdot 10^{-29}$
P	15	723853	48256,87	130,80	$5,23 \cdot 10^{-42}$
LT·SS	19	17303	910,68	2,47	0,004
LT·P	97	44171	455,37	1,23	0,185
SS·P	32	69089	2159,03	5,85	$1,06 \cdot 10^{-9}$
LT·SS·P	42	17605	419,17	1,14	0,318
Error	64	23613	368,95		
Total	281	1131242	116159,52		

Tabla 3.12: ANOVA de la profundidad de penetración

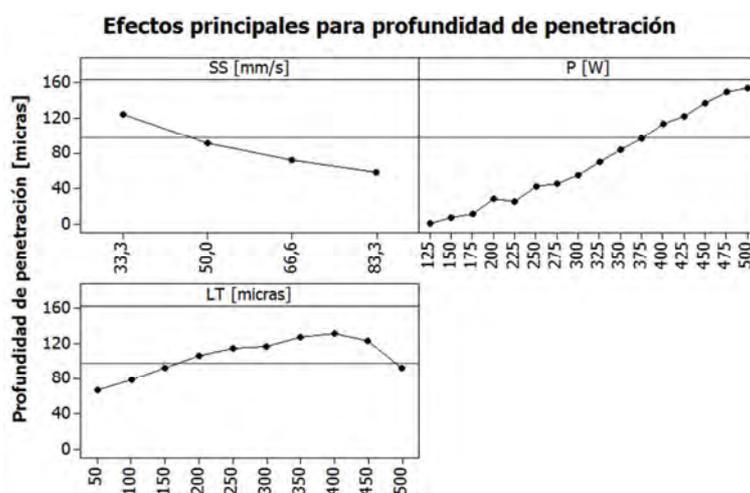


Figura 3.29: Efectos principales para la profundidad de penetración

3.6.2.5 Área

El área del cordón define la superficie que hay de cordón en la sección transversal. Se puede definir tres tipos de áreas dependiendo de la división: (i) superior (ii) inferior y (iii) total. El área superior es la superficie definida entre la línea imaginaria que continua con la base de la placa de construcción y el cordón superior. El área inferior es la superficie definida

entre la línea imaginaria que continua con la base y la superficie de penetración. Finalmente, el área total se define como la suma de las dos áreas anteriores.

Para calcular el área del cordón, se ha realizado un tratamiento de las distintas imágenes obtenidas con el microscopio. Inicialmente se dibuja la línea que define el plano de la base, una vez realizado este proceso, se delimita con una línea continua del área del cordón con la base, además, se dibuja otra línea en el límite entre el cordón y donde no hay material. Para definir estos límites del cordón se ha realizado un cambio en el contraste y el brillo de la imagen y se ha reseguído los límites. Una vez dibujada la línea, se pasa a una imagen a blanco y negro, de esta forma, se puede calcular el número de píxeles que existe en cada una de las dos áreas y convertirlas en unidades de medida según la configuración de los aumentos en que se ha tomado la fotografía.

Si se analiza el ANOVA del área total (Tabla 3.13) se observa que todos los parámetros e interacciones de primer orden tienen un efecto significativo, si bien es cierto que los efectos más importantes se encuentran en los parámetros principales, es decir, la altura de capa de polvo, la velocidad de escaneo y la potencia son más significativos que las interacciones entre parámetros.

Área total	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	1,767	0,196	430,71	1,05·10 ⁻⁵³
SS	3	0,573	0,191	419,33	5,22·10 ⁻⁴²
P	15	1,402	0,093	204,98	4,63·10 ⁻⁴⁸
LT·SS	19	0,031	0,002	3,630	5,59·10 ⁻⁵
LT·P	97	0,241	0,002	5,453	1,04·10 ⁻¹¹
SS·P	32	0,064	0,002	4,420	2,15·10 ⁻⁷
LT·SS·P	42	0,025	0,001	1,311	0,1621
Error	64	0,030	0,000		
Total	281	4,133	0,488		

Tabla 3.13: ANOVA de la área total del cordón

En la gráfica de los efectos principales (Figura 3.30) se observa el comportamiento de los efectos de los parámetros principales. El comportamiento de la área total va relacionado con la densidad de energía y la cantidad de material a fundir, es decir, al aumentar la potencia y disminuir la velocidad de escaneo el área de material fundido va aumentando, por

el otro lado, cuanto más material hay para fundir, mayor es el área. En otras palabras, a medida que va aumentando la energía que se aporta debido a la velocidad de escaneo y la potencia, la cantidad que se funde depende de la cantidad de material que está en aquel momento debajo de la radiación del láser.

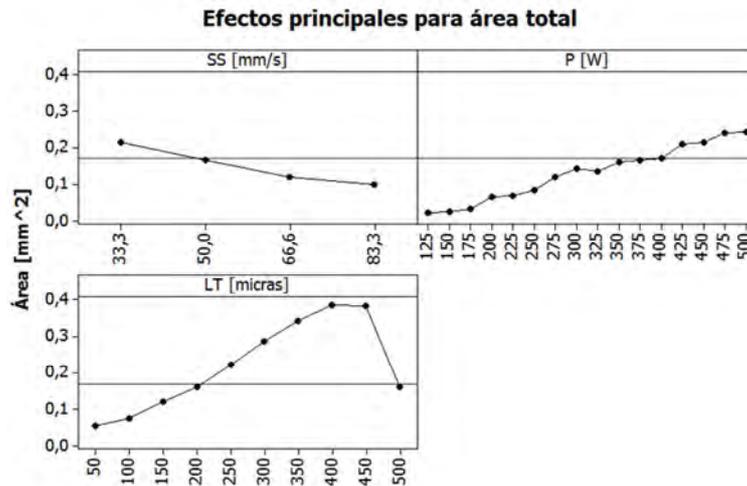


Figura 3.30: Efectos principales para el área total del cordón

Para realizar un estudio del análisis morfológico del cordón fundido es imprescindible estudiar la cantidad de material en la parte superior, formando el que sería la propia capa de material, y la parte inferior que va a ser la capa que signifique la adhesión a la placa. Por este motivo, el comportamiento de los parámetros que tiene sobre el área total del cordón puede diferir en una separación entre las dos áreas descritas anteriormente, la superior y la inferior. Además, se debe tener en cuenta que en la parte inferior se introduce una variación en la formación del cordón debido al material de la plataforma y que para tener una buena adhesión se debe realizar un desplazamiento del material para que el polvo fundido penetre en la plataforma.

En el ANOVA de los efectos de los parámetros e interacciones para el área superior (Tabla 3.14) se mantienen igual que en los efectos de la área total, de forma que los parámetros principales tienen una mayor influencia que las interacciones de primer orden y que, las interacciones de segundo orden no tienen una influencia significativa en el área del cordón superior.

El comportamiento de los efectos principales en el área superior (Figura 3.31) es muy similar al comportamiento de los efectos principales en el área total. Además, se ha realizado un análisis del porcentaje de cordón superior respecto al área del cordón total, observando que el cordón superior representa un 75% (el primer y el tercer cuartil están en el 60 y el 90% respectivamente), significando que la mayor parte del cordón se ha formado para crear la parte del cordón superior. Por este motivo, el comportamiento de los efectos principales es

muy similar al del área total con la diferencia de la variación en la media, que en este caso, se ve disminuido por tener un área menor que la total.

Área superior	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	2,036	0,226	649,64	$2,48 \cdot 10^{-59}$
SS	3	0,273	0,091	261,49	$7,50 \cdot 10^{-36}$
P	15	0,588	0,039	112,55	$5,25 \cdot 10^{-40}$
LT·SS	19	0,022	0,001	3,451	$1,05 \cdot 10^{-4}$
LT·P	97	0,217	0,002	6,432	$1,91 \cdot 10^{-13}$
SS·P	32	0,032	0,001	2,850	$1,82 \cdot 10^{-4}$
LT·SS·P	42	0,021	0,001	1,460	0,085
Error	64	0,022	$3,5 \cdot 10^{-4}$		
Total	281	3,213	0,362		

Tabla 3.14: ANOVA de la área superior del cordón

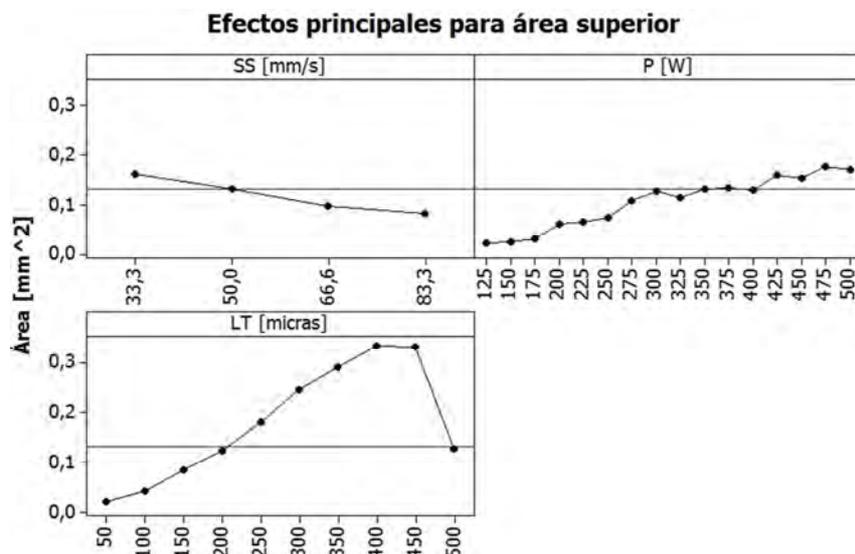


Figura 3.31: Efectos principales para el área del cordón superior

En el ANOVA (Tabla 3.15) de la área de penetración en la placa, los parámetros de velocidad de escaneo y potencia tienen unos valores similares a los otros análisis, no

obstante, el efecto del grosor de la capa tiene menos influencia que en los dos otros casos. Todas las interacciones de primer orden también tienen una influencia aunque no están al nivel de los parámetros principales.

Área inferior	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	0,027	0,003	60,78	$6,11 \cdot 10^{-28}$
SS	3	0,056	0,019	383,05	$8,15 \cdot 10^{-41}$
P	15	0,190	0,013	258,22	$3,37 \cdot 10^{-51}$
LT·SS	19	0,006	$3,3 \cdot 10^{-4}$	6,749	$3,15 \cdot 10^{-9}$
LT·P	97	0,008	$7,96 \cdot 10^{-5}$	1,626	0,019
SS·P	32	0,027	0,001	17,246	$5,23 \cdot 10^{-21}$
LT·SS·P	42	0,002	$3,831 \cdot 10^{-5}$	0,782	0,800
Error	64	0,003	$4,90 \cdot 10^{-5}$		
Total	281	0,319	0,036		

Tabla 3.15: ANOVA de la área de penetración del cordón

Los efectos principales del área de penetración (Figura 3.32) tienen la misma tendencia que en la profundidad de penetración, además, si se comparan los resultados con las dos gráficas anteriores del área, la tendencia para la velocidad de escaneo y la potencia se mantiene similar.

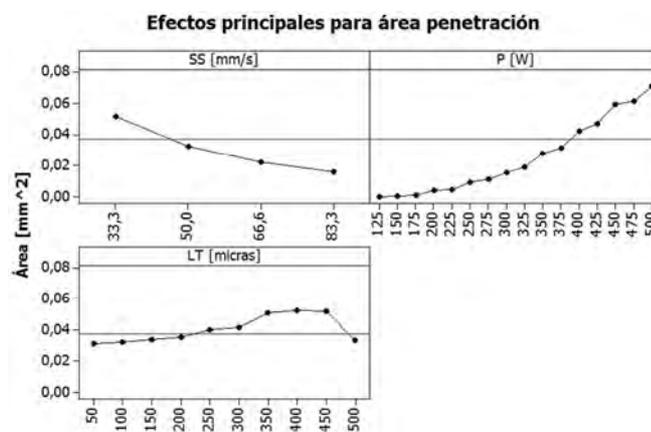


Figura 3.32: Efectos principales para la área de penetración

Dentro del análisis del área inferior existen varios valores donde la área del cordón, al no tener penetración, tiene un valor de 0 (Figura 3.33). Este valor es considerado adecuado ya que el cordón está adherido a través de la unión del cordón superior con la plataforma, sin la necesidad de penetrar dentro de la placa, evidentemente, la adhesión con la plataforma es distinta e indudablemente existe una menor dificultad para poder separar el cordón de la plataforma.

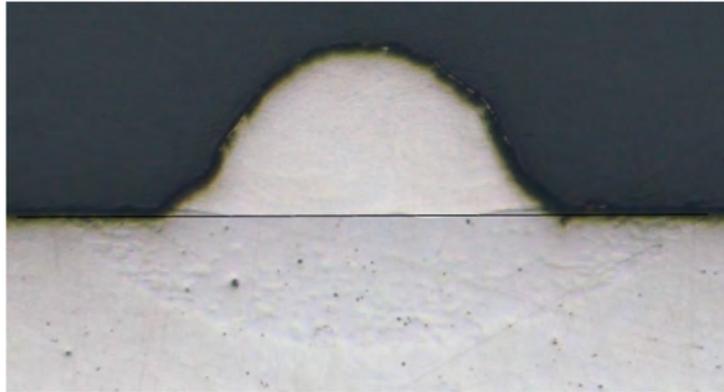


Figura 3.33: Cordón sin área de adhesión. SS=50mm/s, P=225W y LT=100micras

3.6.2.6 Velocidad de construcción

La velocidad de construcción es el volumen de material que es capaz de fundir por unidad de tiempo, en este caso, es la cantidad de material de un cordón simple de CoCrMo que se funde. La velocidad de construcción depende de los parámetros que se utilizan durante el proceso, además se puede determinar básicamente utilizando dos métodos, en el primer caso, teniendo en cuenta todo el material que se ha fundido, o bien, teniendo en cuenta únicamente la parte superior del cordón.

Para la determinación del valor de la velocidad de construcción, se han tomado en cuenta dos áreas, la superior y la inferior. Posteriormente los valores obtenidos, fueron multiplicados según la velocidad de escaneo en que se ha realizado el experimento, es decir, por 33, 50, 66 o 83 mm/s. Por lo tanto, se tiene una velocidad de construcción total (Ecuación 3.5) y una velocidad de construcción del cordón (Ecuación 3.6).

$$V_T = A_T \cdot SS \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$V_{C.S} = A_{C.S} \cdot SS \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Al realizar el ANOVA de la velocidad de construcción (Tabla 3.16), se pudo observar que mediante el valor P todos los parámetros tienen influencia en la velocidad de

construcción, sin embargo, los parámetros de grosor de capa y potencia, tienen un mayor dominio que los demás parámetros.

Vel. fundición	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	3494,74	388,30	208,99	$6,43 \cdot 10^{-44}$
SS	3	56,55	18,85	10,15	$1,48 \cdot 10^{-05}$
P	15	2869,30	191,29	102,95	$8,00 \cdot 10^{-39}$
LT·SS	19	273,66	14,40	7,75	$2,19 \cdot 10^{-10}$
LT·P	97	325,91	3,36	1,81	0,006
SS·P	32	170,17	5,32	2,86	$1,72 \cdot 10^{-04}$
LT·SS·P	42	75,92	1,81	0,97	0,531
Error	64	118,91	1,86		
Total	281	7385,15	625,19		

Tabla 3.16: ANOVA de la velocidad de construcción

Para conocer los efectos que tienen los distintos parámetros se grafica los efectos principales para la velocidad de construcción como en la Figura 3.34. La velocidad de escaneo no tiene influencia en la velocidad de construcción del cordón, mientras que la potencia y el grosor de capa tienen una influencia muy significativa. Si se compara los resultados obtenidos en el área total, la potencia y la altura de capa tienen un comportamiento similar, no obstante, la tendencia que tiene la velocidad de escaneo cambia, obteniendo así, que a mayor velocidad de escaneo se puede aumentar la velocidad de construcción aunque el área de la sección sea más pequeña debido al aumento de la velocidad de escaneo.

En la gráfica (Figura 3.34) se observa el mismo comportamiento que en los otros análisis de la discontinuidad del volumen cuando la altura de la capa de polvo es de 500 micras. Esta discontinuidad es debida al decrecimiento de la altura del cordón y/o del área y el cual también presenta consecuencias en la velocidad de construcción. Esta disminución puede deber a que se ha incluido en el análisis el límite del plano inclinado.

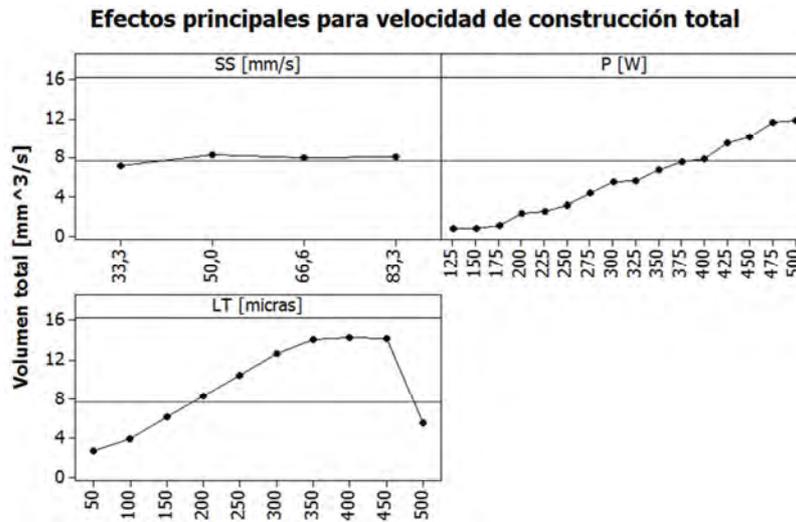


Figura 3.34: Efectos principales para la velocidad de construcción.

Si se realiza el mismo análisis que en el área y se considera únicamente la velocidad del cordón superior, que es efectivamente la que sobresale de la plataforma de construcción, se puede realizar el ANOVA de la velocidad de construcción superior (Tabla 3.17). Para observar el comportamiento de los parámetros, al igual que en el área superior, todos los parámetros e interacciones de primer orden tienen influencia en la velocidad de construcción y, tal y como acontecía en el área, la única que no tiene influencia es la interacción de tercer orden.

Vel. superior	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	4011,68	445,74	311,23	2,76·10 ⁻⁴⁹
SS	3	84,48	28,16	19,66	3,80·10 ⁻⁹
P	15	1280,85	85,39	59,62	1,05·10 ⁻³¹
LT·SS	19	378,66	19,93	13,92	5,25·10 ⁻¹⁶
LT·P	97	290,30	2,99	2,09	9,67·10 ⁻⁴
SS·P	32	186,60	5,83	4,07	8,85·10 ⁻⁷
LT·SS·P	42	62,40	1,49	1,04	0,4404
Error	64	91,66	1,43		
Total	281	6386,64	590,96		

Tabla 3.17: ANOVA de la velocidad de construcción del cordón superior

En la gráfica de los efectos principales, se puede observar (Figura 3.35) que el comportamiento es muy parecido al de la velocidad de construcción del cordón. Los parámetros que tienen una mayor influencia son la potencia y el grosor de la capa que, a medida que va aumentando el valor de estas dos variables, se aumenta la razón de volumen de material fundido por unidad de tiempo. Debido a la gran influencia de estas dos variables, el comportamiento de la velocidad de escaneo es poco significativo, viéndose únicamente en el ANOVA su influencia. El comportamiento de esta variable es proporcional a la velocidad de construcción, es decir, al aumentar la velocidad de escaneo se consigue un mayor ratio de material fundido.

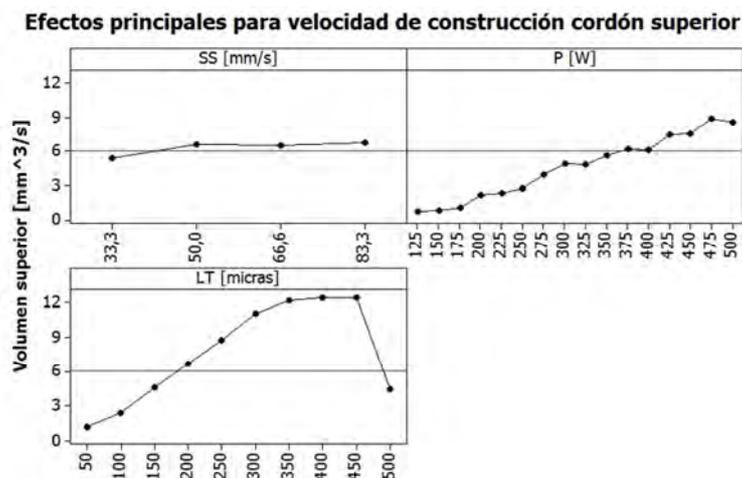


Figura 3.35: Efectos principales para la velocidad cordón superior

3.6.3 Porosidad

La porosidad de un material representa el porcentaje del volumen que ocupan los poros en un volumen unitario de material. La porosidad va relacionada con la densidad del material, y este viene determinada por el volumen y el peso de la pieza. Se define la porosidad como el porcentaje de volumen de aire que contiene el volumen de la pieza.

La porosidad de una pieza de metal, fabricada mediante SLM, se ha ido cuantificando desde la aparición del proceso y esta ha ido disminuyendo a medida que el proceso ha ido evolucionando. En la pulvimetalarlurgía se puede cuantificar algunas de las propiedades del material a través de la porosidad de material, siendo que los poros actúan como concentradores de esfuerzos, dando así lugar, a una plasticidad más temprana del material, y por lo tanto, dando un comportamiento mecánico inadecuado a través de la fractura por grietas.

El objetivo del proceso de SLM, en la mayoría de los casos, es tratar de conseguir una densidad del 100% o bien muy cercana, sin embargo, los procesos convencionales actualmente tienen el mismo reto. Debido a la metodología de fabricación capa a capa, es un

objetivo más difícil de lograr en SLM, ya que durante el proceso de fabricación, el polvo no es compactado antes de ser fundido y, por lo tanto, durante el proceso los únicos parámetros que influyen es la gravedad y los efectos causados por el calentamiento del material hasta llegar a ser líquido. Además, la porosidad únicamente cuantifica el porcentaje de material que no hay en un área o volumen, por lo tanto, no cuantifica cual es la dimensión y su distribución en la sección del cordón. La dimensión y la distribución del poro tienen un profundo impacto en la propia porosidad y también en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas.

Existen varios tipos de porosidades, no obstante, nos centramos en la porosidad primaria, que consiste en poros de tamaño grande los cuales se obtiene principalmente debido al proceso de acomodo de las partículas del polvo. La densificación de estas partículas de polvo es la principal acción que se debe llevar a cabo durante la sinterización o fundición. Por lo tanto, la porosidad primaria final depende del tamaño inicial de las partículas de polvo de CoCrMo debido a que existe una reordenación de las partículas a través del nivelado del polvo. Consiguientemente, al utilizar una distribución de tamaño de partículas entre 20 a 50 micras se garantiza una buena interdifusión de las partículas entre sí a través del movimiento. Aunque es difícil de calcular, la porosidad inicial en la plataforma una vez se ha distribuido el polvo es alrededor del 40% (Chawla & Deng, 2005). Una vez realizado la fundición con los distintos cordones, se han obtenido una porosidades mínima de 0,9% y una porosidad media del 5,75%.

Para determinar la porosidad obtenida en cada uno de los cordones, se realizó una calibraron las micrografías (Figura 3.36a) obtenidas mediante un microscopio y mediante se el software ImageJen se convirtieron a blanco y negro. Como se puede ver en la Figura 3.36b, la parte blanca corresponde a los poros y la parte de color negro corresponde al material, de este modo, la porosidad como la razón entre el número de píxeles de cada uno de los colores. Cabe mencionar que las ralladuras del pulido igualmente se calibraron para no ser tomadas en cuenta como poros y obtener ruido en las mediciones.

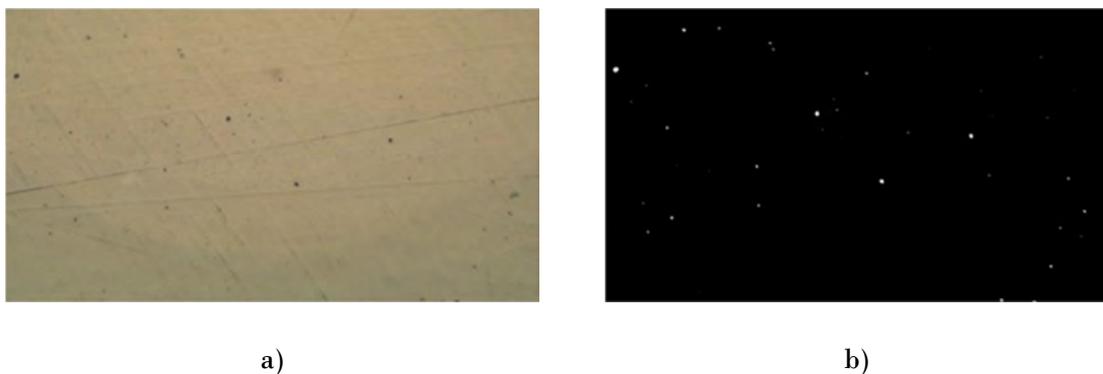


Figura 3.36: Proceso de transformación de la imagen a) imagen microscopio b) imagen binaria

La porosidad típica que se obtiene de los procesos convencionales en los productos obtenidos mediante la pulvimetalurgia varía entre el 5 y el 20% (Noguchi & Nakagawa,

1999). Si la porosidad adquirida en este experimento puede ser replicado para la formación de un producto completo, el rendimiento del proceso sería clasificado con 1,43 donde el valor mínimo de rendimiento debe ser superior a 1,33, significando así el potencial del proceso SLM dentro de la manufactura.

Analizando las imágenes, se puede observar que existen dos tipos de poros, los poros con geometría redonda, formada durante el proceso de sinterización y la geometría irregular, formada durante el proceso de compactación. La porosidad que predomina en los experimentos son circulares con unos resultados de redondez entre el 79 y el 91,9%, estos resultados reflejan el tipo de geometría de poro que se crea.

La geometría del poro determina la tensión que se crea internamente en la pieza, un poro con geometría redonda tiene menos tensión que un contorno con vértices pronunciados, provocando con esto una mayor concentración de tensión y una mayor facilidad en la fractura (Chawla & Deng, 2005).

Para determinar la distribución de la porosidad se realiza un análisis visual de los poros. En la Figura 3.37, se puede observar que la distribución de la porosidad es aleatoria, esto significa que la formación de poros se realiza de forma casual y sin seguir una tendencia en su distribución.



Figura 3.37: Distribución aleatoria de la porosidad

La literatura, estipula que el tamaño del poro, es otro factor que se debe tener en cuenta y además propone distintas clasificaciones: microporo ($<0.002 \mu\text{m}$), mesoporo ($0.002 - 0.05 \mu\text{m}$) o macroporo ($>0.05 \mu\text{m}$). Durante el análisis de la densidad se obtuvo que el diámetro medio del poro, fue de $0,9454 \mu\text{m}$ (macroporo) y un área de $0,759 \mu\text{m}^2$. Se encontró que el diámetro de los poros, con una probabilidad del 95% se encuentra entre $0,920$ y $0,971 \mu\text{m}$.

Para determinar si los parámetros del proceso (potencia, velocidad de escaneo y grosor de capa de polvo) tienen una influencia en la densidad de los cordones y en el tamaño medio del poro se realizó un análisis estadístico de la variancia (ANOVA). Mediante un modelo factorial general y lineal, la media total de las porosidades resulto ser de 5,7% y un tamaño medio del poro de $0,759 \mu\text{m}^2$. La variación total (SST) indica la variación de la porosidad y el tamaño de poro debido a los factores principales e interacciones, teniendo en

cuento los distintos niveles, así como también el error experimental durante las mediciones. La variación de la media (SSE) indica la variación debido al error experimental y denota las variaciones debidas al efecto de cada factor y las interacciones entre los factores.

De los resultados de ANOVA en cuestiones de porosidad (Tabla 3.18) se pudo observar que el grosor de la capa y la velocidad de escaneo tienen una influencia en la porosidad, así como las interacciones entre estos factores, a excepción de la velocidad de escaneo con la potencia.

Porosidad	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	0,122	0,0135	24,54	$2,42 \cdot 10^{-16}$
SS	3	0,004	0,0015	2,778	0,0494
P	14	0,009	0,0006	1,236	0,2762
LT·SS	27	0,100	0,0037	6,712	$1,1 \cdot 10^{-9}$
LT·P	118	0,113	0,0009	1,747	0,0104
SS·P	42	0,033	0,0008	1,457	0,0934
LT·SS·P	159	0,167	0,0010	1,906	0,0031
Error	56	0,030	0,0005		
Total	428	0,582	0,0228		

Tabla 3.18: ANOVA de la porosidad

El resultado del efecto del grosor de la capa en la porosidad (Figura 3.38) muestra que la porosidad se reduce incrementando el grosor, pudiendo presentarse debido a que durante la compactación del polvo se da de mejor forma en altos grosores de capa, provocando que exista un mayor contacto entre las distintas partículas y, en consecuencia, el coeficiente de conductividad térmico más alto. Además, la densificación de las piezas viene determinada por el tiempo y la temperatura, por lo tanto, a una mayor conductividad térmica entre las partículas provoca que se formen unos cordones más densos y, por lo tanto, que se disminuya la porosidad.

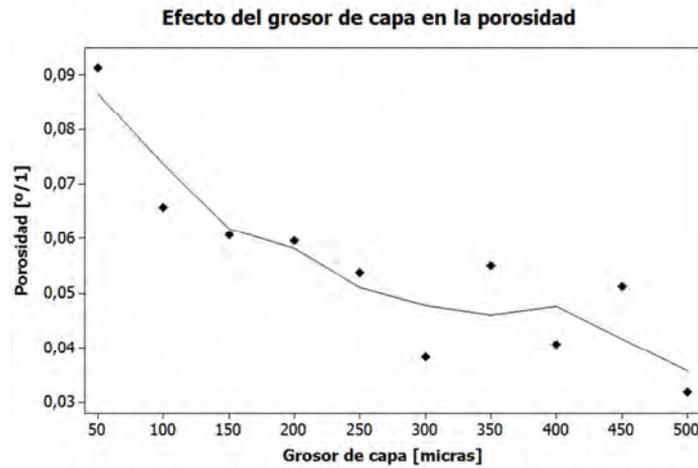


Figura 3.38: Media de la porosidad en función de altura de capa

De los resultados del ANOVA sobre el tamaño de la porosidad (Tabla 3.19) se desprende que los factores de altura de capa, velocidad de escaneo y su interacción tienen únicamente un comportamiento significativo en el tamaño del poro.

Tamaño poro	df	SS	MS	F	P-value
LT	9	2,994	0,332	2,133	0,0414
SS	3	9,714	3,238	20,76	3,5·10 ⁻⁹
P	14	3,597	0,256	1,647	0,0945
LT·SS	27	21,04	0,779	4,997	1,9·10 ⁻⁷
LT·P	118	26,53	0,224	1,441	0,0635
SS·P	42	8,614	0,205	1,315	0,1677
LT·SS·P	159	27,348	0,172	1,102	0,3423
Error	56	8,733	0,1559		
Total	428	108,57	5,3652		

Tabla 3.19: ANOVA tamaño del poro

En este caso, el tamaño de la porosidad se ve influenciado más por la velocidad de escaneo (Figura 3.39). La experimentación realizada indica que a menor velocidad de

escaneo, mayor es el tamaño del poro. Los cambios en la estructura del material, como la recristalización o el crecimiento del grano, pueden explicar este comportamiento. Si se basa en este último punto, el crecimiento del grano permite la densificación y el movimiento de los poros. Si la temperatura se mantiene por un periodo largo de tiempo, se promueve el crecimiento del poro.

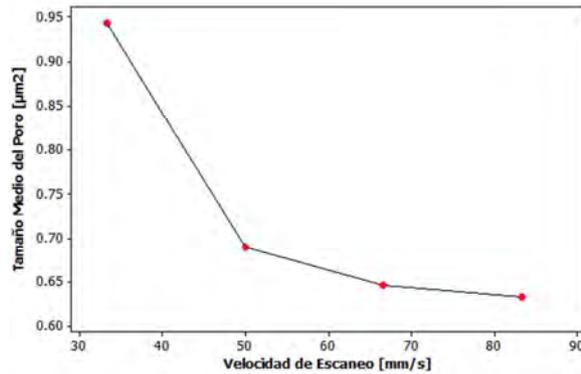


Figura 3.39: Media del tamaño del poro en función de la velocidad de escaneo

La idea de este apartado es determinar la ventana del proceso capaz de optimizar la porosidad, en este caso, si se basa únicamente en el porcentaje de la porosidad se encuentra que la porosidad más baja se obtiene mediante la utilización de unos valores medios de velocidad de escaneo (50-66,6 mm/s) con grandes capas de grosor de polvo (Figura 3.40a). Por el contrario, si se desea obtener un pequeño tamaño de poro este debe realizarse con una alta velocidad de escaneo (83,3 mm/s) y con una capa de polvo alta (Figura 3.40b).

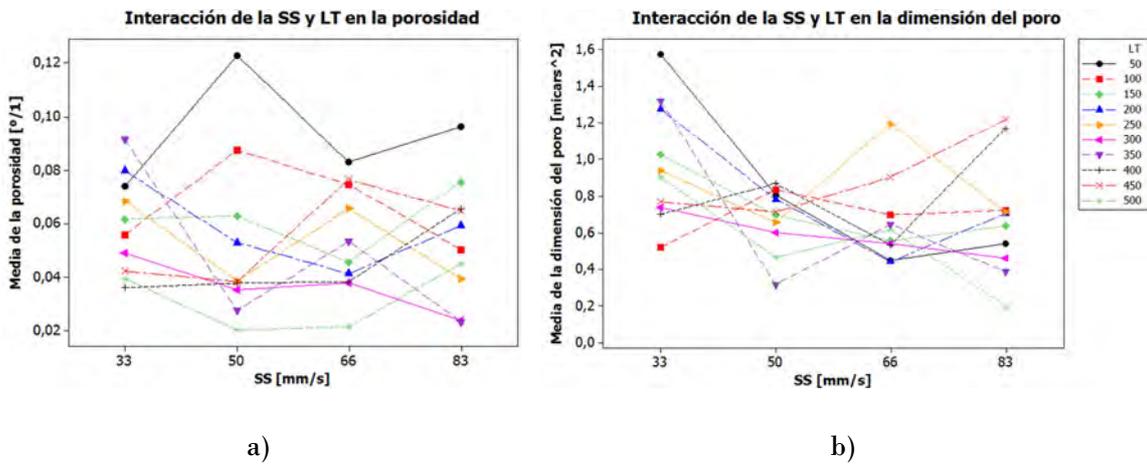


Figura 3.40: Interacción de la velocidad de escaneo y el grosor de capa en a) porosidad y b) dimensión del poro.

3.6.4 Microdureza

En el proceso de SLM intervienen dos tipos de procesos, por un lado, un proceso físico y por el otro lado un proceso térmico, que depende de muchos factores, entre ellos, la potencia del láser, la velocidad de escaneo y el grosor de la capa de polvo. Estas variables se han ajustado mediante el diseño de experimentos permitiendo estudiar cómo afectan estas variables en la microdureza y tratar de evitar aquellas interacciones que tienen un efecto perjudicial en la dureza.

El ensayo de microdureza Vickers es un método para medir la dureza de los materiales. La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración o el rayado. Para ensayar la dureza se utiliza una máquina con un penetrador de diamante con forma de pirámide el cual tiene un ángulo de 136° . El ensayo consiste en penetrar la pirámide en el material con una carga conocida, una vez realizada la penetración se mide la dimensión de las diagonales del cuadrado que se dibuja en la superficie (Figura 3.41) y se realiza un promedio de las dos medidas obtenidas.

La utilización de un microdurómetro es debido a la pequeña área de trabajo que se tiene en el cordón. Uno de los problemas que ocurren durante la medición de la microdureza es la pisada que se produce, es una pisada muy superficial y la probabilidad de encontrar un poro es muy baja, mientras que midiendo macrodureza las posibilidades aumentan, en este caso, los resultados que se obtienen pueden ser superiores a los resultados que se obtendrían en una misma pieza calculado en macrodureza.

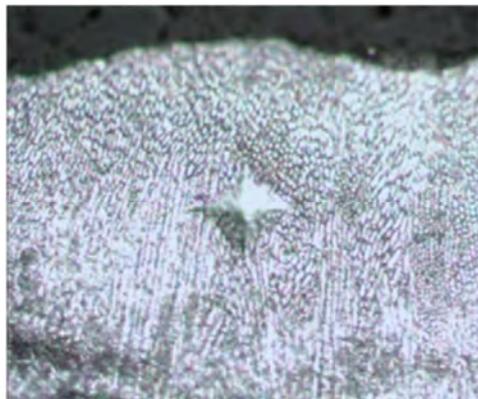


Figura 3.41: Marca que se obtiene de la penetración.

Otro de los factores que puede determinar que la dureza de las piezas obtenidas mediante SLM sea superior a las obtenidas en los procesos convencionales, es que el tratamiento térmico del propio proceso, aumenta la dureza del material, como en el templado.

De los resultados del análisis de la varianza sobre la microdureza (Tabla 3.20) se desprende que la altura de capa, la velocidad de escaneo y su interacción tienen un

comportamiento significativo en la microdureza, al igual que la altura de capa en interacción con la potencia.

Microdureza	df	SS	MS	F	P-value
LT	5	62159,5	12431,9	4,33	0,005
SS	3	104201,9	34734	12,10	3,34·10 ⁻⁰⁵
P	14	56761,7	4054,4	1,41	0,21
LT·SS	9	91102,3	10122,5	3,53	0,005
LT·P	51	287292,1	5633,2	1,96	0,03
SS·P	37	77464,5	2093,6	0,73	0,81
LT·SS·P	25	115347,3	4613,9	1,61	0,115
Error	27	77512,3	2870,8		
Total	171	871841,6	76554,3		

Tabla 3.20: ANOVA de la microdureza

Como se puede observar, la velocidad de escaneo es el parámetro que tiene más influencia sobre los valores de microdureza, este factor puede ser atribuido al tiempo en que el rayo láser irradia a la superficie. Si se aumenta el tiempo de incidencia del láser en la superficie se aumenta la temperatura, y a la vez que el laser se desplaza, la temperatura disminuye rápidamente, estos cambios en la fundición- solidificación permite aumentar la densidad y consecuentemente la oposición a la penetración.

Si se compara la influencia de los parámetros en la microdureza (Figura 3.42) se puede observar que existe una dispersión de los resultados en la altura de capa y la potencia. Los gráficos muestran una forma en dientes de sierra, significando que los resultados obtenidos tienen una influencia estadística mediante el análisis de variancia pero sin tener una tendencia clara de cómo afectan a la dureza.

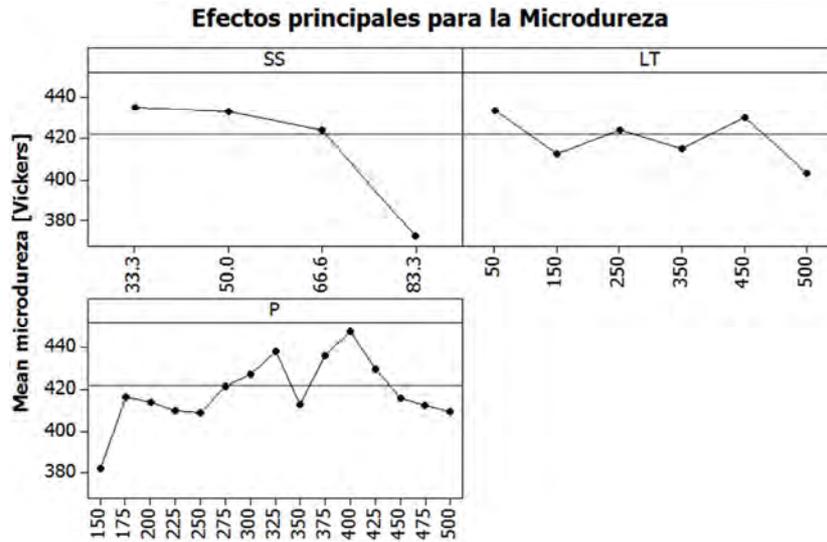


Figura 3.42: Influencia de los parámetros de proceso en la microdureza

La Figura 3.43 muestra cómo afecta el parámetro de la potencia a la microdureza, revelando una tendencia poco definida pero con un valor máximo de microdureza en 400W. En este nivel de potencia se consigue fusionar las partículas de forma apropiada y permite una correcta densificación y dureza del cordón, sin embargo, si se sobrepasa esta potencia, la dureza va disminuyendo, de tal forma que a una potencia de 500W tiene una media de la microdureza parecida a 250W. En este caso, para obtener un cordón simple con una alta dureza, es aconsejable no sobrepasar la potencia de 400W porque no mejora los resultados. Tomando en cuenta la interacción de los parámetros de velocidad de escaneo y altura de capa, la mayor dureza se obtiene mediante los valores bajos de estos parámetros, es decir, con una velocidad y una altura de capa baja.

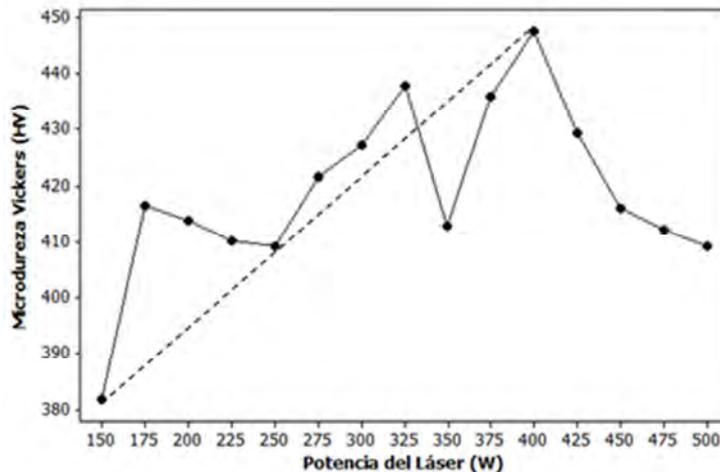


Figura 3.43: Influencia de la potencia en la microdureza

parámetro. El parámetro que tiene una mayor influencia en las características geométricas es la altura de la capa de polvo, la cual tiene un gran dominio en el ángulo de contacto, la altura del cordón, el error relativo en la altura, el ancho, el área, la velocidad de construcción y la porosidad. Posteriormente, se encuentra el parámetro de la potencia donde tiene una influencia significativa en el ancho y en la penetración del cordón, mientras que la velocidad de escaneo únicamente es influyente en la microdureza del cordón. Las partes geométricas vienen determinadas por la potencia y la altura de la capa de polvo, permitiendo cambiar la geometría del cordón debido a una mayor cantidad de polvo para poder crear el cordón y una potencia suficiente para poder fundir esta cantidad de polvo. Por otro lado, la microdureza viene determinada por la velocidad de escaneo, de hecho, la velocidad de escaneo determina el tiempo que la energía del láser irradia el polvo y por lo tanto, el tiempo que tiene el material para formar la microestructura, propiedad que influye sobre todo en la dureza del material.

Se debe tener en cuenta que la realización de la experimentación en un ambiente controlado, con disminución de oxígeno y oxidación, disminuiría la densidad de energía a suministrar y cambiarían las características geométricas obtenidas durante el proceso de SLM del CoCrMo, por lo que no es posible realizar una comparación con los resultados de un proceso estándar de SLS o SLM.

Capítulo 4. Caracterización mecánica del producto

La variación de los parámetros del proceso es uno de los principales factores, además del material, que modifican las propiedades mecánicas de las piezas. Es importante saber el comportamiento final de la pieza cuando se varía uno de los parámetros del proceso, para asegurar si va a soportar la fuerza a la que será sometida. En el presente capítulo se modifican varios parámetros del proceso de distintas tecnologías de adición de capas, y se estudia su efecto en características geométricas, físicas y mecánicas mediante la fabricación de piezas test.

4.1 Tecnologías

Actualmente, existen varias máquinas comerciales que permiten la fabricación de piezas mediante la tecnología AM, estas máquinas son desarrolladas y programadas para poder fabricar con una restricción de materiales que vende el mismo fabricante. En el presente apartado se realiza un estudio de las propiedades mecánicas de distintas piezas test fabricadas mediante diferentes máquinas de sinterización y fundición selectiva por láser.

Uno de los problemas que se producen en este tipo de proceso es que el fabricante de la tecnología comúnmente es el mismo que comercializa el material y además sólo recomienda los parámetros de procesos que aseguran la obtención o fabricación de las piezas asociados a éstos materiales. Así mismo, informa únicamente de las propiedades mecánicas que se obtienen cuando se utiliza los parámetros estandarizados de fabricación. El proceso SLS y SLM no está optimizado ya que como se ha observado en el anterior capítulo, existen parámetros que mejoran unas características y al mismo tiempo empeoran otras. Si bien es cierto, algunas compañías dan un rango de valores para trabajar con un material específico, no especifican cuales van a ser las propiedades de la pieza fabricada y, aún menos, especifican cómo afectan las interacciones en el propio proceso.

Se pretende estudiar cómo afectan algunos parámetros del proceso en distintas tecnologías de AM. Para poder realizar el estudio se realiza un estudio de los distintas tecnologías que se pueden utilizar, en este caso, se utilizan tres tecnologías distintas: (i) DTM Sinterization 2500 para la tecnología Selective Laser Sintering (SLS) actualmente de la compañía 3DSystems (3D Systems), (ii) EOS M250Ext para la tecnología Direct Metal Laser Sintering (DMLS) de la compañía EOS (EOS) y finalmente (iii) M3 Linear usada para la tecnología Selective Laser Melting (SLM) de la compañía Concept Laser (Concept-laser).

Para conocer cada uno de los distintos procesos y máquinas se realiza una explicación de cada una de ellas con los conceptos básicos de unión entre partículas y con las principales características de cada máquina. Para cada uno de los procesos se busca un material parecido al acero, para tener el material lo más similar posible. Aunque no es posible encontrar un material igual para cada uno de los procesos, se intentan que se puedan comparar entre si y tratarlos como materiales semejantes.

Las distintas tecnologías que se utilizan durante este capítulo siguen los mismos principios básicos de fabricación del capa a capa, no obstante, existe una gran diferencia entre la unión de las partículas entre los tres procesos. En SLS se utiliza un láser de CO₂ de baja potencia y es necesario un post-proceso de infiltración, por otro lado se utiliza un láser de CO₂ de alta potencia en DMLS y de fibra para SLM, de este modo, no es necesario ningún post-proceso porque se consigue la fundición. Los tres procesos utilizan un mismo sistema de fabricación pero con la diferencia de la unión entre partículas, por lo tanto, se puede estudiar cómo afecta los parámetros dentro el mismo proceso y también como afecta las distintas uniones, no obstante, no se puede realizar de forma absoluta porque no se ha utilizado el mismo material.

4.1.1 SLS – DTM Sinterization 2500

La máquina DTM Sinterization 2500 (Tabla 4.1) es una máquina de sinterización selectiva por láser que mediante la fuente de 50W de CO₂ sinteriza las partículas de polvo, debido a su baja potencia no permite fundir las partículas de polvo. En este caso, el material

en polvo está mezclado con un material polimérico que se utiliza como aglutinante y al fundirse se pega con las partículas de metal. El material se encuentra en la plataforma de aportación, el polvo se distribuye a través de un rodillo cilíndrico y lo esparce en la plataforma de construcción. Al igual que casi todas las tecnologías de AM, la pieza es fabricada a través del método capa a capa hasta obtener la pieza final.

Compañía	Modelo	Tecnología	Laser	Potencia	Material
3D Systems	Sinterization 2500	SLS	CO ₂	50W	ST-200

Tabla 4.1: Máquina utilizada para el proceso de SLS. Fuente: (Delgado & Ciurana, 2012)

Una vez terminada la pieza es necesario un postproceso para aumentar la densidad de las piezas, que inicialmente es del 70%. Adicionalmente el post-proceso también es utilizado para aumentar las propiedades mecánicas. Debido al tipo de consolidación que utiliza este tipo de tecnología, la parte que sale de la máquina es relativamente poco resistente, lo que obliga a realizar una infiltración normalmente de cobre, para aumentar la densidad al 99% y las propiedades mecánicas.

El proceso de infiltración (Figura 4.1) consiste en introducir la pieza obtenida del proceso de SLS en un horno, el cual tiene una temperatura que permite derretir el polímero y que a través de la difusión va penetrando al interior de la pieza, rellenando los espacios donde no hay material. Dependiendo de la concentración de aglutinante y de material infiltrado se obtienen unas propiedades mecánicas distintas, por este motivo, se debe realizar un ajuste del tiempo del proceso de infiltración (Noguchi & Nakagawa, 1999).

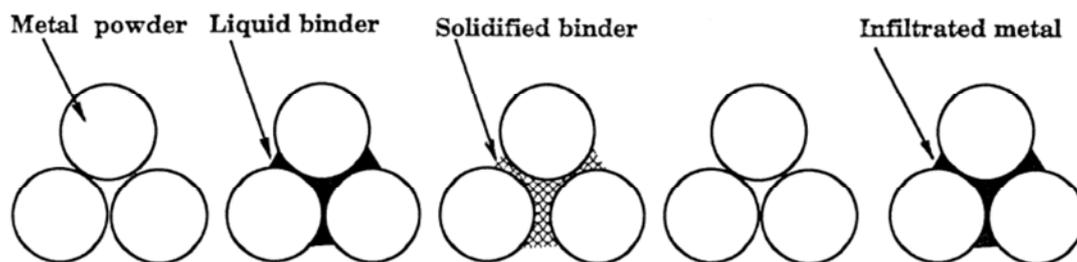


Figura 4.1: Proceso de consolidación de las piezas mediante SLS con aglutinante. Fuente: (Noguchi & Nakagawa, 1999)

Si el material infiltrado sobresale de la pieza y no se ha tenido en cuenta durante la fabricación, la pieza pierde parte de las propiedades dimensionales, siempre que no haya contracciones durante el proceso de infiltración (Noguchi & Nakagawa, 1999). Además, el

proceso reduce las tensiones internas debido al choque térmico a través de la relajación del material.

4.1.2 DMLS – EOS M250Extended

La tecnología de sinterización por láser de forma directa, donde se sinteriza un material metálico es conocida con la nomenclatura DMLS. La tecnología es similar a la SLS pero difiere en que en el proceso no se diferencia el material aglutinante y el material estructural, en este caso, existe un material con un punto bajo de fusión, que actúa como aglutinante, pero que forma parte del propio material final.

El proceso DMLS usa un láser de CO₂ (Tabla 4.2) dónde únicamente funde una parte de material, de forma que existen partículas de polvos que empiezan a hacer los cuellos de la sinterización o difusión, sin llegar a volverse líquidos, por lo tanto, se puede observar las partículas con un punto de fusión más alto. Normalmente, el material aglutinante utilizado durante el proceso es el boro o el cobre, debido a su baja temperatura de fusión, ayudando así a la formación de las piezas.

Compañía	Modelo	Tecnología	Laser	Potencia	Material
EOS	M250 Extended	DMLS	CO ₂	200W	DS-H20

Tabla 4.2: Máquina utilizada para el proceso de DMLS. Fuente: (Delgado & Ciurana, 2012)

El proceso de la compañía EOS realiza dos tipos estrategias de escaneos, la corteza y la parte interna. El escaneo de la corteza se realiza con parámetros del proceso que permiten que se obtenga una mejor unión entre las partículas, a contrapartida de aumentar el tiempo de trabajo. Por el otro lado, la parte de piel interna se realiza con unos parámetros que permiten fabricar la pieza más rápido pero, en su lugar, la unión entre las partículas es más débil. También es importante remarcar que durante el escaneo de la corteza, no sólo aumenta las propiedades mecánicas sino que también hay una mejora en la calidad dimensional de las piezas y en la densidad, llegando a valores alrededor del 95%.

4.1.3 SLM – M3 Linear

El proceso de fundición selectiva por láser, conocida con las siglas SLM, utiliza una metodología similar al proceso SLS. La gran diferencia que existe entre las dos tecnologías es el material, el cual no contiene partículas poliméricas, además el tipo de láser que utiliza es de fibra con una potencia de 100W (Tabla 4.3).

Compañía	Modelo	Tecnología	Láser	Potencia	Material
Concept Laser	M3 Linear	SLM	Fibra	100W	CL20

Tabla 4.3: Máquina utilizada para el proceso de SLM. Fuente: (Delgado & Ciurana, 2012)

El proceso de SLM utiliza un proceso semejante a la microsoldadura donde se funde todas las partículas, de forma que no existe una diferencia entre el material estructural y el aglutinante (proceso SLS) o el material con un bajo punto de fusión (proceso DMLS). El proceso crea una pequeña piscina de material fundido a través de la energía que suministra el láser, una vez el láser deja de irradiar la superficie, se enfría y se compacta formando la capa de material. El material tiene tensiones internas debido al gradiente térmico que se produce durante el proceso, sin embargo, el material que se consigue tiene una gran dureza y una alta densidad (por encima del 95%).

4.2 Diseño de experimento

El diseño de experimentos se realiza teniendo en cuenta diferentes parámetros de proceso y estudiando su influencia en la fabricación de las piezas finales. Para ello, se considera evaluar las características dimensionales, mecánicas y físicas.

El diseño de experimentos (Tabla 4.4) está formado por 4 placas para cada uno de los procesos, de forma que se cuentan con dos parámetros y dándole dos niveles a cada uno. En el proceso DMLS y SLM se modifica la altura de capa y la velocidad de escaneo, mientras que para la tecnología SLS se varía la altura de capa y la potencia del láser debido a que por razones técnicas no se puede modificar la velocidad de escaneo.

Diseño de experimentos	SLS		DMLS		SLM	
Parámetros y niveles	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 2
Altura de capa [micras]	70	100	20	40	30	60
Velocidad de escaneo [mm/s]	22W	26W	300	360	400	500

Tabla 4.4: Diseño de experimentos modificando la velocidad y la altura de capa

Como se puede observar, el nivel 1 de la altura de capa corresponde a la altura estándar de la tecnología, mientras que el nivel 2 corresponde al doble de la altura estándar, esto factor no acontece en la tecnología SLS porque la capa inicial es de 70 micras y realizar el doble el láser no permitiría fundir toda la capa, con la consiguiente no fabricación de la probeta. Si se hace referencia a la velocidad de escaneo, se puede observar que el incremento es del 20% para el proceso de DMLS y del 25% para el proceso de SLM. Como se ha comentado anteriormente, en la tecnología SLS no se podía modificar la velocidad y se realizó el mismo experimento pero en este caso variando la potencia de escaneado. En este caso, el nivel 1 también significa el valor estándar de fabricación.

Para estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas se realizan 5 probetas (Figura 4.2), de las cuales dos de ellas se repiten modificando solo la dirección de fabricación, es decir, unas se fabrican en posición horizontal (1 y 2) y las otras son rotadas 90°, es decir, fabricadas en posición de canto (3 y 4). Las probetas que se realizaron están estandarizadas según la normativa de ensayos a tracción (ISO 6892-1:2009) y de ensayo a flexión para metales (ISO 7438:2005). La última probeta es para observar la densidad y estudiar la composición química de la pieza.

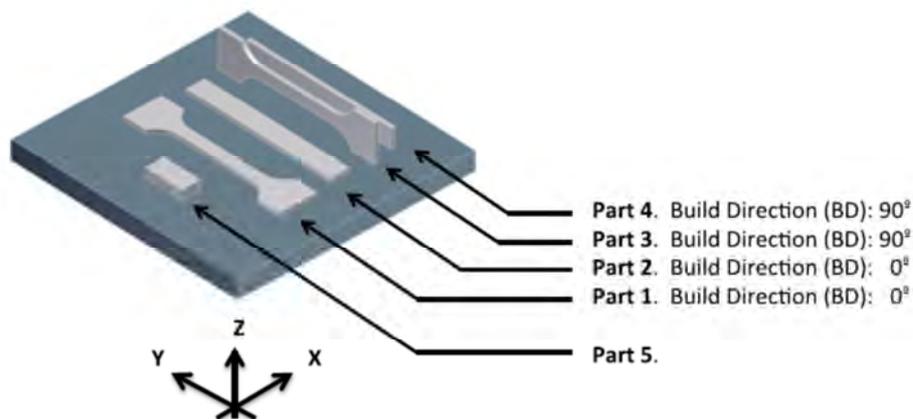


Figura 4.2: Fabricación de las probetas. Fuente: (Delgado et al., 2012c)

La caracterización de las piezas mediante la tecnología AM es una de las principales líneas de investigación dentro de la área de AM porque es necesario saber el comportamiento de los materiales que aparecen en el mercado y conocer los posibles campos de aplicación, por este motivo, es necesario caracterizar el proceso sabiendo la porosidad, la composición química, rigidez, tipo de fractura y/o rotura.

Para clasificar cada una de las 4 placas y cada una de las distintas probetas de los ensayos se ha realizado una tabla de nomenclatura (Tabla 4.5), de este modo, durante el análisis se hablará de la probeta P1.1, significando que se encuentra en la placa 1 y el número de la probeta (tracción a 0°) haciendo referencia según la nomenclatura de las probetas (Figura 4.2).

Diseño de experimentos	Velocidad nivel bajo	Velocidad nivel alto
Espesor nivel bajo	Placa 1	Placa 3
Espesor nivel alto	Placa 2	Placa 4

Tabla 4.5: Clasificación de las placas según los niveles

4.2.1 Composición química

Una vez realizada cada una de las piezas mediante los procesos de SLS, DMLS y SLM, se realizan los post-procesos pertinentes en cada una de los casos, en este caso, la extracción de las piezas de la plataforma de construcción, limpieza de probetas y sobretodo la infiltración de las piezas fabricadas mediante SLS. Una vez obtenidas las piezas, se realiza un análisis de la composición química (Tabla 4.6) mediante un microscopio electrónico de barrido equipado con un detector de energía dispersiva de rayos X con la P1.5.

Material	Cu	Sn	Fe	Cr	Ni	C	P	Sn	Si	Mn	Mo	Otros
ST 200	40,5	5,4	46	7	-	0,05	0,02	0,03	0,5	0,5	-	-
DS-H20	0,4	-	80,5	4,4	12,4	-	-	-	-	-	0,2	2,1
CL20	-	-	65	17	12	-	-	-	-	2	2,5	1,5

Tabla 4.6: Composición química de los 3 materiales [% peso]. Fuente: (Delgado & Ciurana, 2012)

El microscopio de barrido utilizado durante el análisis es de la marca Zeiss modelo DSM 960A con un rango de aumentos entre 20x a 200.000x, equipado además con detectores de señal de Rayos X por separación de energías, conocido con la nomenclatura EDX.

La tecnología EDX es una técnica analítica no destructiva utilizada para analizar los elementos o caracterizar una pieza con sus componentes químicos. La tecnología no permite calcular un compuesto, por lo tanto, únicamente se puede saber y semicuantificar el porcentaje de cada uno de los elementos que se encuentra en la muestra. Este análisis se realiza en tiempo real, de forma que se puede verificar la dispersión de los distintos porcentajes de elementos durante el análisis en una misma muestra.

4.3 Consistencia del proceso: Repetibilidad

Para analizar la consistencia del proceso se realiza un estudio de la repetibilidad con la tecnología EOS M250Extended. La repetibilidad o consistencia del proceso indica la variación que ocurre durante el proceso utilizando los mismos parámetros, esto significa que se utiliza el mismo diseño de la pieza, la misma distribución y la utilización de los mismos parámetros en todos los casos y se analiza la variación que existen entre ellas. Hay muchos parámetros que se pueden utilizar para analizar la consistencia del proceso, como puede ser la variación de las propiedades mecánicas, de la composición química, de la densidad, etc. La consistencia del proceso analizada en el proceso DMLS es dimensional.

Durante la fabricación se observa que hay varios procesos que dependen de la acción humana, por ejemplo, la colocación de la placa, la calibración dentro de la máquina o incluso definir la primera capa de polvo en la plataforma, con lo cual, pueden provocar una variación dimensional en la pieza final.

Todas estas acciones realizadas previamente a la fabricación, además de incluir las propias en la variación de material (porcentajes de elementos, distribución del tamaño del polvo, compactación, etc.) y de la base de construcción (granallado, composición química, rugosidad, etc.) pueden influir en la variación del proceso. Para determinar esta variación dimensional se diseña una pieza que incluye agujeros y planos inclinados (Figura 4.3a) y se realizaron 8 piezas colocándolas en distintas direcciones (Figura 4.3b). Producto de lo anterior, se observa que ocurre un problema durante el proceso de la distribución del polvo porque el rodillo impacta contra la pieza. Para evitar que el golpe sea muy intenso, se rotara la pieza a 15° para que el contacto entre el dispensador de polvo y la pieza sea progresivo.

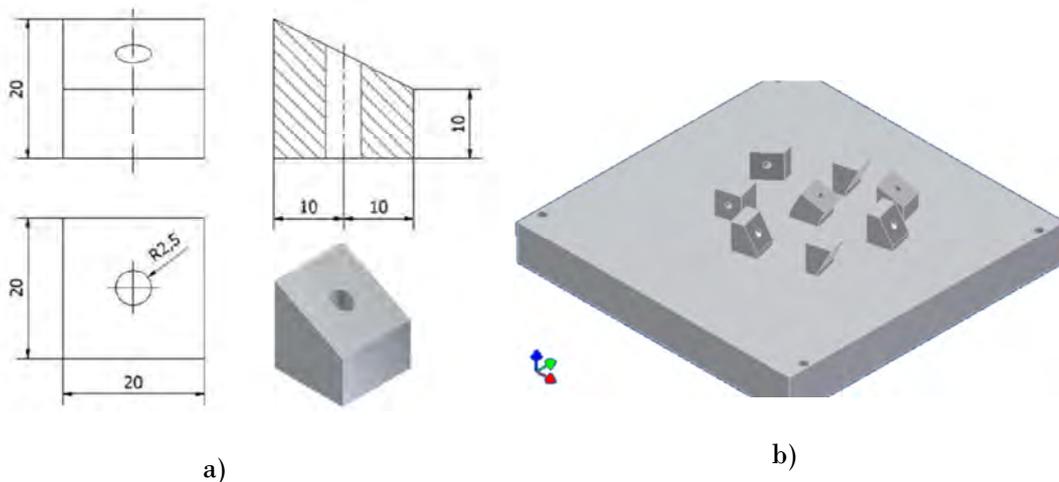


Figura 4.3: a) pieza b) distribución en la placa. Fuente: (Delgado et al., 2010)

En total, se realizan 4 placas para poder determinar la variación dimensional del proceso DMLS, las mediciones se realizan en una máquina de coordenadas Mitutoyo Crystal

Apex 544. Para poder asegurar una correcta medición y establecer la precisión dimensional de la máquina de coordenadas (0,1 micras) se realizan las mediciones mediante el control numérico de la máquina y poder evaluar el mismo punto en todas las piezas. La máquina está equipada con dos sensores de temperatura para poder afrontar las variaciones de temperatura durante el análisis.

Antes de depositar la primera capa de polvo se calcula la planicidad de la plataforma de construcción. Con el fin de conocer la llanura de las plataformas de construcción, se calculan 900 puntos en cada plataforma, obteniendo como resultado que la diferencia máxima es de 10 micras. La capa de polvo depositada en la experimentación es de 20 micras, por lo que esta diferencia repercute en la fabricación de la pieza final.

Otro factor importante es la inclinación de la plataforma una vez se ha instalado dentro de la máquina. La máquina EOS tiene dos tornillos que nos permiten modificar la inclinación de la placa. La inclinación de la placa se realiza de forma manual y el fabricante asegura una correcta fabricación si la inclinación es inferior a 10 micras a lo largo de toda la plataforma (250x250mm).

Durante el análisis de la repetibilidad de las piezas fabricadas mediante la tecnología DMLS se calculan 825 puntos, para cada una de las plataformas, de modo, que se calcularon las medias de cada punto para cada una de las tres coordenadas principales (Tabla 4.7a), en consecuencia se puede observar que las desviaciones se encuentran en las coordenadas X e Y, mientras la desviación en Z es inferior, dando valores de desviaciones de 3 a 3,5 veces mejor que en los otros dos ejes. Además, se analiza la información teniendo en cuenta la desviación máxima de cada punto según su eje (Tabla 4.7b).

Desviación	Media	Máxima	Mínima		Núm.	Error medio	Error máx.	Error mín.
	[mm]	[mm]	[mm]					
X	0,050	0,532	0,001	X	316	0,095	0,532	0,031
Y	0,057	0,372	0,001	Y	320	0,126	0,193	0,045
Z	0,016	0,493	0,001	Z	189	0,047	0,382	0,045
Total	0,041			Total	825	0,096		

a)

b)

Tabla 4.7: Resultados repetibilidad a) Desviación total b) Desviación peor coordenada por punto calculado. Fuente: (Delgado et al., 2010)

De los 825 puntos calculados, el 77% tiene un mayor error en las coordenadas X e Y, por lo contrario, el 23% de los puntos tienen una desviación mayor en el eje Z. Las medias de los errores indican una buena repetibilidad en el eje Z mientras que los otros dos ejes tienen una repetibilidad mucho inferior, aun así, los resultados obtenidos dan una repetibilidad con una media de 41 micras en todos los ejes, un buen resultado teniendo en cuenta la multitud de parámetros que intervienen durante el proceso.

Si se analiza la planitud de cada superficie (Figura 4.4), de las 8 piezas fabricadas en cada una de las 4 plataformas y se agrupan en los distintos planos que se generan (XZ, YZ y XY), recordando que los planos XZ e YZ están rotados 15° para tener una entrada progresiva a la hora de distribuir el polvo, se encuentra que la mejor planitud está en el plano XY (0,01mm).

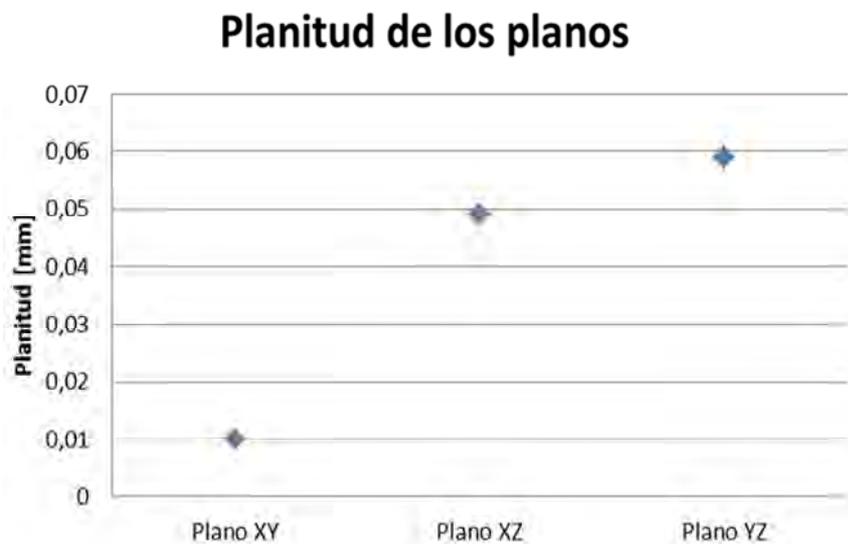


Figura 4.4: Planitud media de los planos

Por lo tanto, se obtiene que la mayor repetibilidad del proceso se encuentra en la altura de la pieza y que además la mejor superficie se obtiene en el plano XY, dando lugar que la tecnología realiza un amplio campo de baño fundido y teniendo un control muy superior de la altura de éste. Las dos coordenadas, X e Y, se obtienen unos resultados peores que el anterior debido a que disminuye el control de la amplitud del baño fundido, dando lugar a un empeoramiento de la planitud de los respectivos planos.

4.4 Influencia de los parámetros

Las propiedades de un material dependen de su estructura interna y condicionan su comportamiento durante el proceso de fabricación, a la vez que le confieren utilidad para

unas determinadas aplicaciones, es por este motivo que existe una influencia de los parámetros del proceso en las características dimensionales, propiedades mecánicas, físicas y químicas de la pieza final. Según Khanig (Khaing et al., 2001) estas propiedades se basan en gran medida en la composición del material y en las condiciones de solidificación.

4.4.1 Error dimensional - e [%]

El error dimensional de las piezas fabricadas mediante los procesos de sinterización y fundición por adición de capas se ven influenciados principalmente por los gradientes térmicos que ocurren durante el proceso de fundición de las partículas y la consiguiente solidificación y, por el otro lado, por la altura de la capa de polvo depositada. El proceso de sinterización o de fundición de las partículas ocurre en un periodo muy corto de tiempo, en el orden de milisegundos, y uno de los principales factores que se deben controlar es la dimensión de la piscina de baño líquido y como este líquido se esparce en la capa.

Además, del propio proceso de sinterización o fundición, se debe tener en cuenta la resolución de las máquinas, donde interaccionan normalmente los movimientos mecánicos, por un lado, la altura de la capa y el repartimiento del polvo en la plataforma de construcción y, por otro lado, aquellos elementos que intervienen en los movimientos de los espejos galvanométricos y que realizan el movimiento del haz láser en toda la superficie de trabajo. La altura de capa que comúnmente se usan en las máquinas comerciales está entre las 20 y las 100 micras, aunque se pueden encontrar máquinas que permiten realizar capas nanométricas para micropiezas.

Como se ha visto en el apartado anterior, la repetibilidad de las máquinas es alta, si se tiene en cuenta el número de variables que intervienen y las posibles variaciones que pueden aparecer durante el proceso. Cada una de las placas de la experimentación realizada tiene únicamente una probeta de cada tipo, es decir, hay dos probetas de tracción (0 y 90°), dos probetas de flexión (0 y 90°) y finalmente una probeta para calcular la porosidad.

Se utilizan las dos probetas de ensayo a tracción y flexión (Figura 4.5) para determinar el error dimensional de las piezas fabricadas mediante cada proceso y estudiando el comportamiento cuando se varían los parámetros del proceso. Para extraer las piezas de la plataforma es necesario separar la pieza de la placa, en todos los casos se utilizó una máquina de electroerosión por hilo. Este post-proceso hace que no se puedan conocer algunos errores dimensionales porque viene determinado por el mismo post-proceso, por lo tanto, se utiliza el ancho de la probeta de tracción (6 mm) y la de flexión (10 mm) para determinar el error dimensional de la anchura y para el espesor (2 mm) según la dirección en que se ha construido la probeta.

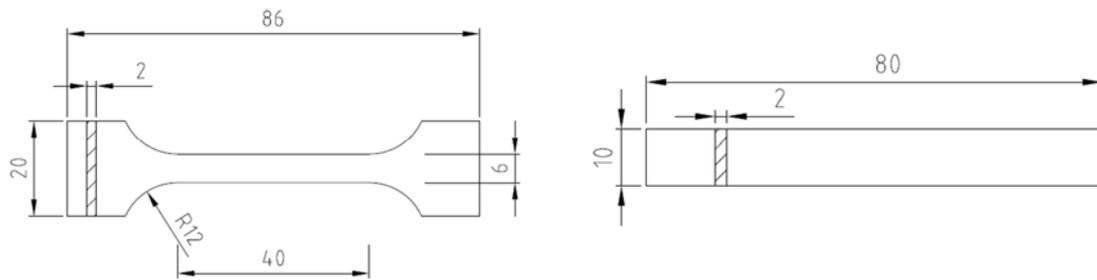


Figura 4.5: Probetas análisis errores dimensionales. Fuente: (Delgado et al., 2012c)

Las mediciones se realizan mediante un calibre con un rango de medición de 150mm y con una precisión de 0,01mm. Para determinar las desviaciones se realiza 5 mediciones para cada uno de las probetas y se utiliza el promedio para compararlo con la dimensión nominal, permitiendo así definir el error que se obtiene en la fabricación tanto en la anchura como en el espesor de las probetas (Tabla 4.8).

Desviación	Ancho	Espesor	Ancho	Espesor	Ancho	Espesor
	SLS	SLS	DMLS	DMLS	SLM	SLM
Placa 1	0.643	0.618	0.425	0.057	0.070	0.067
Placa 2	0.668	0.605	0.548	0.060	0.050	0.250
Placa 3	0.520	0.757	0.443	0.033	0.012	0.048
Placa 4	0.678	0.700	0.510	0.037	0.105	0.113
Media	0.627	0.670	0.481	0.047	0.059	0.119

Tabla 4.8: Desviación de las probetas. Ancho y espesor en [mm].

La desviación de las piezas en cada uno de los procesos es graficado (Figura 4.6) para poder observar el comportamiento de cada uno de los procesos y observar la tendencia cuando se varían los parámetros.

Como se puede observar, los peores resultados, en términos medios, se dan en el proceso de SLS, continuando después por el proceso de DMLS y, finalmente, el mejor resultado se consigue a través de SLM. Si se observa los resultados obtenidos por el proceso de DMLS, se puede observar que existe una gran diferencia entre los errores del ancho y del espesor de la pieza. Estas diferencias en las desviaciones entre procesos son debidas al principio básico de unión entre las partículas.

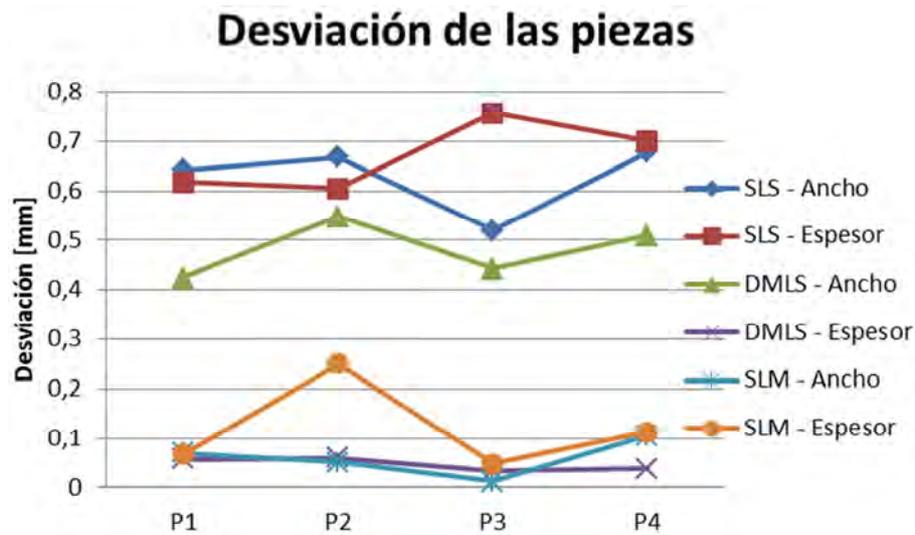


Figura 4.6: Desviación de las probetas. Ancho y espesor en [mm].

En el caso de la tecnología SLS utiliza el sinterizado y un post-proceso de infiltración, de forma que durante esta infiltración existe una modificación dimensional de las piezas fabricadas. En el caso de la tecnología DMLS, utiliza un láser de CO₂ que tiene una menor penetración de la energía, de forma que se distribuye en la superficie y es más difícil de controlar la anchura (Delgado et al. 2012c). Por el contrario, el láser de fibra penetra de forma más profunda y evita tener un recrecimiento en el ancho de la pieza. En el caso de la altura del cordón, viene determinado por la plataforma de construcción y la precisión del repartimiento del polvo, no obstante, el volumen de la área fundida no es el mismo, por lo que la tecnología DMLS, al no penetrar tanto, tiene un mayor control en el espesor comparado con el proceso SLM.

4.4.2 Porosidad

La porosidad y la densidad son términos relacionados en las propiedades físicas de los materiales, estos son función de los parámetros de proceso y del tipo de proceso térmico. En el proceso SLS, la densidad teórica del material es del 100% y llega a partir del post-proceso de infiltración de material que rellena los espacios o poros que exista en la pieza. En el caso del proceso DMLS, el polvo sólo se sinteriza, provocando que no se funda completamente todas las partículas de polvo de la pieza y aparezcan espacios donde no esté ocupado por material, formando un poro. Finalmente, en el caso del proceso SLM, existe una completa fundición del material, se obtienen unas densidades aproximadas a los procesos de fundición tradicional (Ghany & Moustafa, 2006). Además de la porosidad que aparece en el propio cordón, aparecen porosidades entre la unión de los cordones y además, debido al tipo de proceso discontinuo, también, aparecen porosidades entre las distintas capas de material.

La porosidad y el tipo de porosidades que tiene una pieza tienen un efecto muy importante en las propiedades mecánicas de las piezas final. La porosidad se puede calcular a través del método de Arquímedes, aun así, es interesante utilizar el microscopio para entender la presencia de los poros, ver el tamaño de éstos (Vandenbroucke & Kruth, 2007) y sobretodo la geometría del poro para evitar concentraciones de tensiones.

Para determinar la porosidad de cada una de las tecnologías y según los parámetros que se han utilizado, se han fabricado para cada una de las placas una pieza para analizar la porosidad (Figura 4.7), para observar la porosidad se ha realizado una preparación de las muestras tal y como se ha explicado en el capítulo 3.5 Preparación de las muestras.

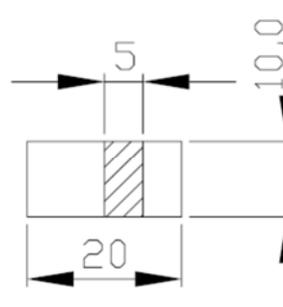


Figura 4.7: Probeta análisis porosidad. Fuente: (Delgado et al., 2012c)

Para determinar la porosidad (Figura 4.8) se usa un microscopio óptico Carl Zeiss Jena vaert con un rango de magnificaciones entre 5 y 200 aumentos aunque, durante el análisis de la porosidad, únicamente se usa la magnificación de 5 y 10 aumentos según la probeta y para observar la porosidad entre los distintos procesos. De esta forma, se puede determinar la porosidad y, además, observar la dimensión y distribución de los poros.

Una vez se obtienen las imágenes se utiliza el CobCal, un software de análisis de imagen, que permite calcular el porcentaje de colores que tiene la misma, por lo tanto, en este caso no se realiza una imagen binaria para poder definir zona de material y zona de porosidad. En el caso de la tecnología SLS, se puede observar en color gris la zona de material sinterizado y en color amarillento el material infiltrado, en las otras dos tecnologías, el material tiene un color homogéneo.

La porosidad obtenida de los distintos experimentos y para cada una de las tecnologías se detalla en la Tabla 4.9. Si el análisis se centra específicamente en cada una de las tecnologías de forma independiente, se observa dos tipos de valores, por un lado el proceso SLS tiene dos valores, el primer valor es la porosidad obtenida de la pieza final, mientras que el valor que está entre paréntesis, es el porcentaje de material infiltrado. Los valores de los procesos DMLS y SLM únicamente tienen un valor que es la porosidad de la pieza final.

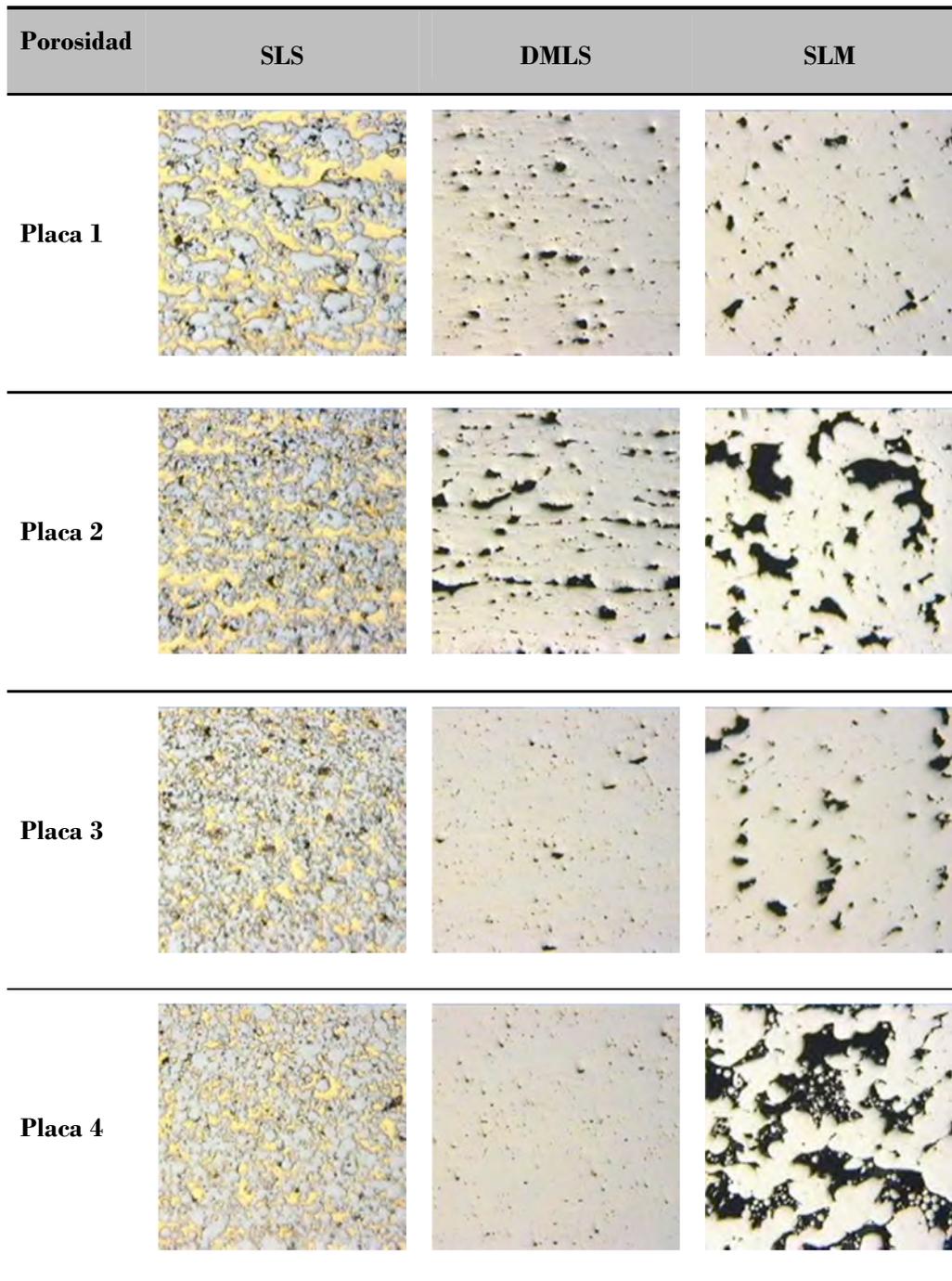


Figura 4.8: Porosidad de las probetas. Aumentos 10x. Fuente: (Delgado & Ciurana, 2012)

La porosidad obtenida en SLS viene determinada únicamente por el post-proceso de infiltración, por lo tanto, para analizar la porosidad del proceso SLS es necesario estudiar la cantidad de material que se ha infiltrado, además de contabilizar la parte que aún hay porosidad. Como se puede observar, si se utiliza los parámetros del proceso comercial se obtienen los peores resultados. Sin embargo, al aumentar únicamente la potencia, se obtiene una mejor fundición del material aglutinante con la posible evaporación parcial, dando lugar, a que el material estructural ocupa más espacio que en los otros casos.

Porosidad [%]	SLS	DMLS	SLM
Placa 1	1,81 (25,49)	2,78	6,29
Placa 2	1,74 (24,29)	11,54	20,51
Placa 3	1,17 (12,08)	2,25	7,62
Placa 4	0,86 (14,67)	1,76	28,9
Media	14,43	4,58	15,83

Tabla 4.9: Porosidad de las probetas. Fuente: (Delgado et al., 2012e)

En el caso del proceso DMLS se obtiene una menor porosidad utilizando unos valores de velocidad y grosor de capa altos. Aunque la diferencia no es muy significativa, el comportamiento es el mismo que se desprende del análisis del cordón simple. Por otro lado, los parámetros óptimos en SLM para la porosidad se dan con los parámetros que están estandarizados por. Como se puede observar en las imágenes, al aumentar la altura de capa (placa 2 y placa 4) existe un cambio muy acentuado de la porosidad, obteniendo una incorrecta fundición.

El tipo de poros que se obtienen en los distintos procesos son diferentes según el proceso utilizado y la forma en aglutinar o fundir el polvo. Los parámetros dentro del mismo proceso también tienen una influencia, de forma que se puede encontrar poros pequeños en las piezas obtenidas mediante SLS, con las probetas 3 y 4 en DMLS y en las placas 1 y 3 en SLM cuando se comparan los propios procesos.

También es interesante observar la geometría del poro, una geometría con unos poros muy regulares y redondeados evitan que se generen tensiones internas muy elevadas y, por el contrario, si los poros son abruptos y con cantos muy vivos provocan que las tensiones internas sean muy grandes, promoviendo el crecimiento rápido de grietas que disminuyen las propiedades mecánicas de la pieza. Todos los poros de las piezas fabricadas mediante el proceso SLS tienen una geometría muy regular, además la infiltración permite reducir las tensiones térmicas debido al horneado. La tecnología DMLS fabrica las piezas (P1, P3 y P4) con unos poros relativamente pequeños y bastante redondos, a medida que aumenta la porosidad estas se desarrollan con una geometría muy abrupta e irregular, siguiendo además el camino del láser, de forma que el láser no es capaz de sinterizar toda la capa. La tecnología SLM tiene una porosidad muy regular en la probeta 1 y 3, en cambio, las otras dos tienen una geometría irregular pero con cantos poco abruptos de forma que no se concentra tensiones ya que son redondeados.

4.4.3 Rugosidad, Ra

Los ensayos de rugosidad se realizaron mediante un rugosímetro Mitutoyo Surfes SV-2000 que se encuentra en un laboratorio de metrología donde se permite obtener un control de la temperatura y de la humedad durante la medición.

Para analizar la rugosidad se utilizara las probetas de flexión (piezas 2 y 4) para cada uno de las 4 placas, de esta forma, se realizan las mediciones tanto del plano de construcción XY como del plano XZ. Para realizar la medición de la rugosidad media (Ra) se utiliza la ISO 468:1982 con una longitud de medición efectiva de 40mm, se captura el valor cada 4 micras, con una velocidad de 2 mm/s, obteniendo así un total de 10.000 puntos para cada uno de los perfiles, además, se realiza 5 muestreos para cada una de las piezas para poder realizar un promedio de la rugosidad obtenida.

Según los parámetros en que se realiza el proceso de sinterización o fundición se obtienen distintas rugosidades en la pieza (Ghany & Moustafa, 2006). Se puede modificar la rugosidad realizando un post-proceso de arenado. El arenado es una técnica que elimina y limpia la superficie mediante un abrasivo, normalmente arena, el proceso permite disminuir o aumentar la rugosidad final dependiendo del impacto del abrasivo. La rugosidad media (Tabla 4.10) no depende únicamente de los parámetros del proceso que se han utilizado, también viene determinado por el plano en que se mide la rugosidad, sobre todo el proceso DMLS y SLM, debido al método de fabricación discontinuo del capa a capa.

Tecnología	SLS	SLS	DMLS	DMLS	SLM	SLM
Plano	XY	YZ	XY	YZ	XY	YZ
Placa 1	5,628	6,755	5,092	14,769	11,349	8,637
Placa 2	8,371	6,803	7,672	18,428	28,395	5,824
Placa 3	5,784	4,436	6,521	19,029	17,942	7,179
Placa 4	3,929	7,370	5,223	19,679	31,311	8,514
Media	5,928	6,341	6,127	17,976	22,249	7,538

Tabla 4.10: Rugosidad de la probetas

El proceso SLS tiene una media de la rugosidad inferior a los otros dos procesos, teniendo en cuenta la media de los dos planos analizados. Tal y como se puede observar, el

proceso DMLS y SLM se ven influenciadas claramente por el plano donde se realiza la medición, de forma que, los efectos son invertidos entre las dos tecnologías.

El proceso SLS utiliza la infiltración para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las piezas, no obstante, durante la infiltración también rellena las irregularidades en la superficie, por lo que los dos planos analizados tienen un mismo rango de valores, cosa que no ocurre en los otros dos procesos.

En la gráfica (Figura 4.9) se puede observar el comportamiento de la rugosidad para cada una de las placas y cada proceso. Como se puede observar, los valores predeterminados por las empresas que suministran la tecnología dan una mejor rugosidad (placa 1) que en los demás experimentos, exceptuando el proceso de SLS que, tal y como se ha comentado anteriormente, existe un post proceso que modifica la rugosidad final de la pieza.

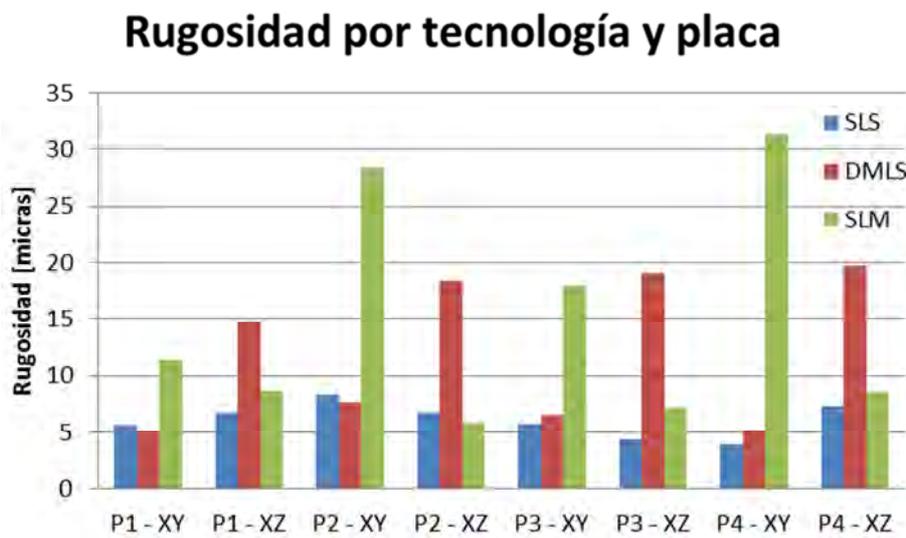


Figura 4.9: Rugosidad obtenida por cada una de las tecnologías y experimento según el plano

Si se compara los resultados (Tabla 4.11) de la rugosidad obtenidas respecto a otras referencias que existen en la literatura (Ghany & Moustafa, 2006), se puede concluir que la información que dan sobre la rugosidad es de la superficie con una menor rugosidad superficial, no obstante, normalmente en las piezas se utiliza más de una superficie, por lo que es necesario definir la rugosidad para cada uno de las superficies.

Tecnología	SLS	DMLS	SLM
Ra [micras]	4-6	3-5	5-7

Tabla 4.11: Rugosidad de las piezas según tecnología. Fuente: (Ghany & Moustafa, 2006)

4.4.4 Ensayo a tracción

El ensayo a tracción es un ensayo normalizado siguiendo la normativa ISO 6892-1:2009. La normativa está redactada para realizar ensayos a tracción de piezas metálicas, si bien es cierto, que las piezas que se realizan mediante SLS, DMLS y SLM son de sinterización metálica, la normativa no sería completamente adecuada para las piezas finales obtenidas por este tipo de tecnologías. Sin embargo, se detectó que durante la realización de la tesis se está desarrollando una normativa específica para la tecnología de adición de capas, concretamente para piezas poliméricas fabricadas en AM.

Para la realización de los ensayos, se utiliza una máquina de ensayo universal Autograph AG-IS de la compañía Shimadzu (Figura 4.10) sin uso de extensómetros.



Figura 4.10: Ensayo a tracción

La velocidad de ensayo es de 2mm/min con un cabezal que captura una fuerza máxima de 50kN. Los valores de la fuerza vs desplazamiento son filtrados para eliminar los valores atípicos del inicio de señal y para recortar la captura de los datos. Con el software propio de la máquina se extrae la tensión de rotura (R_{mt}), el módulo de Young (E_t) y la elongación máxima (e) (Tabla 4.12) de las probetas de tracción para cada uno de los distintos experimentos.

Se puede observar el comportamiento de las probetas a tracción en el proceso de SLS (Figura 4.11). Las probetas tienen un comportamiento muy lineal, sin una zona de deformación plástica, es decir, el comportamiento del proceso SLS es similar al comportamiento de un material frágil. También se puede observar que los mejores resultados se obtienen mediante los parámetros nominales, placa 1, y en las dos direcciones de fabricación. Además, se puede observar que las gráficas se agrupan por placas, es decir, las roturas vienen determinadas por los parámetros de la altura de la capa de polvo y la

potencia. Por lo tanto, la dirección de fabricación da pequeñas variaciones en el comportamiento pero, estas son poco significativas con los otros dos parámetros.

Ensayo de tracción	SLS			DMLS			SLM			
	R _{mt} [MPa]	E _t [GPa]	e [%]	R _{mt} [MPa]	E _t [GPa]	e [%]	R _{mt} [MPa]	E _t [GPa]	e [%]	
Placa 1	0°	228	12,2	1,89	841	12,0	4,86	580	32,1	12,18
	90°	263	7,5	3,54	773	13,5	5,46	572	38,2	9,30
Placa 2	0°	16	8,1	0,20	758	12,0	3,96	231	21,3	1,73
	90°	21	7,3	0,29	610	15,3	4,49	242	18,0	1,71
Placa 3	0°	-	-	-	756	15,4	4,12	446	29,6	2,98
	90°	75	9,8	0,80	862	12,5	6,38	405	29,1	2,93
Placa 4	0°	30	7,6	0,38	444	20,3	2,96	115	14,1	1,29
	90°	23	7,5	0,30	512	12,8	4,18	147	13,1	1,79
Media	93,71	8,57	1,18	694,5	14,23	4,55	342,25	24,44	4,24	

Tabla 4.12: Resultados de los ensayos a tracción. R_{mt} = tensión de rotura, E_t = módulo de Young, e = elongación máxima

Según los parámetros de fabricación de las probetas a tracción existe una alta variabilidad en las propiedades mecánicas (tensión máxima y desplazamiento), por lo que se pueden conseguir que las probetas, una vez infiltradas, consigan soportar fuerzas entre 21 y 263MPa, con un módulo de Young entre 7,3 y 12,2 GPA y con deformaciones relativamente pequeñas, con valores entre 0,2 y 3,54%. Las probetas fabricadas con los parámetros estándares y dados por el suministrador de la tecnología son los que dan un mejor comportamiento en todos los parámetros de salida analizados.

El comportamiento de las probetas de ensayo a tracción de las probetas DMLS (Figura 4.12) es parecido a la del proceso de SLS. No se puede observar una deformación plástica definida y, por lo tanto, se puede considerar un material frágil. No obstante, el desplazamiento y en consecuencia, la deformación es el doble de la obtenida mediante el

proceso de SLS. Por parte de las dos tecnologías significa que existe un alto riesgo de fractura súbita una vez sometidos a esfuerzos de tracción, porque no dan un aviso en la rotura.

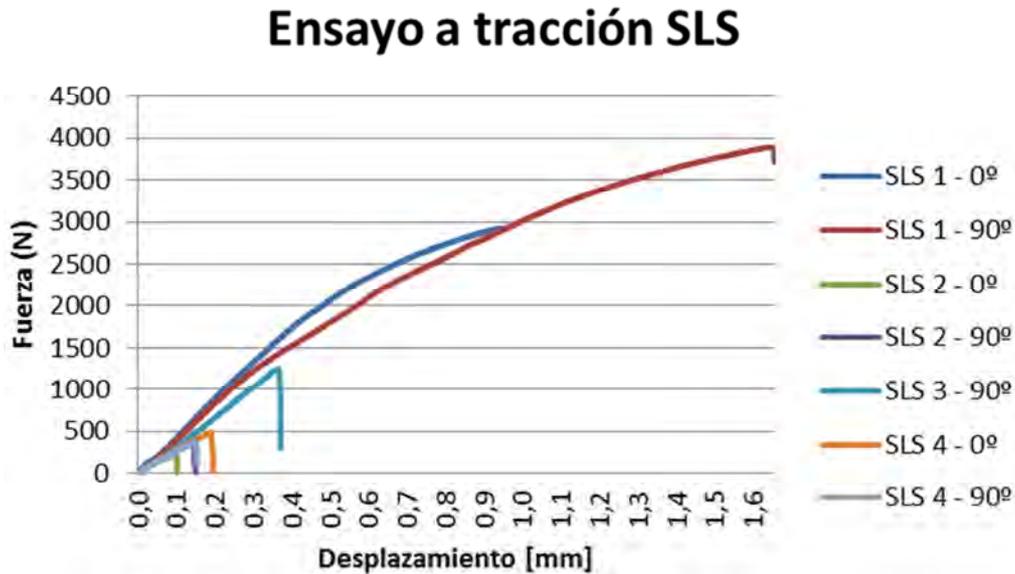


Figura 4.11: Ensayo a tracción del proceso de SLS, gráfica fuerza vs desplazamiento

La tensión de rotura del proceso de DMLS es significativamente superior que el del proceso SLS, donde los valores están entre 444 y 841 MPa, demostrando que soporta el doble de esfuerzo que el mejor ensayo del proceso de SLS. El módulo de Young se encuentra entre 12 y 20,3 GPa y con deformaciones comprendidas entre 2,96 y 6,38% según las condiciones analizadas en el proceso. Los parámetros suministrados por la compañía resultan ser los mejores, en este caso, existe la placa 3 que tiene un comportamiento al esfuerzo superior a los otros parámetros de proceso, no obstante, los resultados son únicamente en una sola dirección de fabricación (90°), mientras que los parámetros estándares tienen un comportamiento muy similar en ambas direcciones.

El comportamiento de las probetas de ensayo a tracción de las probetas SLM (Figura 4.13) mostrado en las gráficas es completamente distinto que los demás procesos de fabricación. En el proceso de SLM se puede diferenciar el comportamiento del módulo de Young con la deformación plástica, teniendo un comportamiento similar a un material metálico.

El proceso de SLM soporta un esfuerzo entre 115 y 580 MPa, bastante inferior que el proceso DMLS. El módulo de Young se puede observar claramente en todas las probetas, dando unos resultados entre 13,1 y 38,2GPa y una elongación entre el 1,29 y el 12,18%. En la gráfica es evidente que el comportamiento viene determinado por los parámetros del proceso de la altura de capa y la velocidad de escaneo, dando grandes variaciones entre ellas, mientras que la dirección de fabricación da pequeñas variaciones dentro de cada una de las placas. Las probetas fabricadas con una dirección de fabricación de 0° tienen un

comportamiento más elástico que las fabricadas a 90°, mientras que mayoritariamente las fabricadas a 90° resisten un esfuerzo mayor que las fabricadas a 0°.

Como acontece en los demás procesos, la placa analizada que tiene un mejor comportamiento se ha fabricado con los valores estándares del proceso. Este resultado es debido a que la pieza tiene una tracción interna debido a la contracción térmica durante el proceso de fundición que aparece en la dirección de fabricación, por este motivo, las probetas fabricadas a 90° están precargadas a compresión y cuando se realiza la tracción resiste un mayor esfuerzo.

Ensayo a tracción DMLS

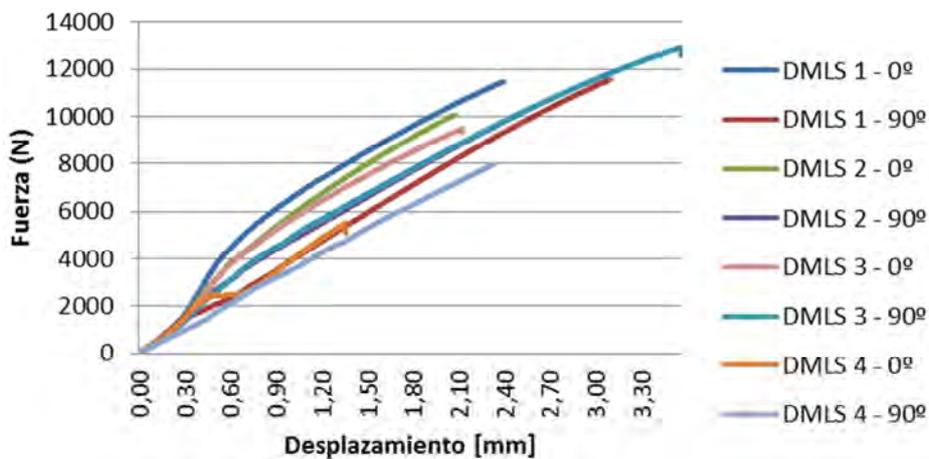


Figura 4.12: Ensayo a tracción del proceso de DMLS, gráfica fuerza vs desplazamiento

Ensayo a tracción SLM

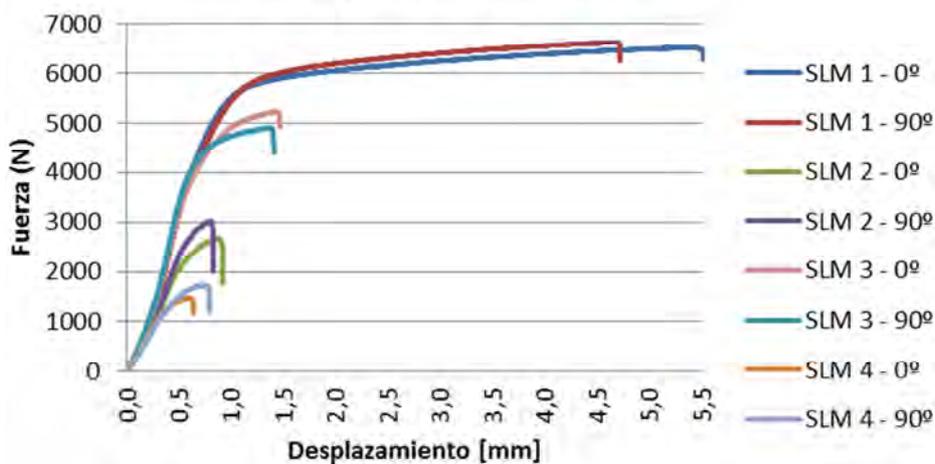


Figura 4.13: Ensayo a tracción del proceso de SLM, gráfica fuerza vs desplazamiento

4.4.5 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión es un ensayo normalizado siguiendo la ISO 2740:2007, para analizar la tensión a la rotura (R_{mb}) y el desplazamiento o flecha (d) obtenida. Los ensayos de flexión se realizan con la máquina universal de ensayos Instron 1122 (Figura 4.14).



Figura 4.14: Ensayo a flexión.

La velocidad de ensayo es de 2mm/min con una fuerza máxima de 5000N y un desplazamiento de 25mm. La distancia entre los utillajes para apoyar las probetas a flexión es de 55,88 mm. Con los datos obtenidos de fuerza – desplazamiento se generan las gráficas y se calculan los parámetros de tensión de rotura y flecha (Tabla 4.13). Algunas probetas del proceso SLM ensayadas no llegaron a calcularse debido a que el programa de ensayo no llegó al final y no pudo calcular el resultado de los parámetros.

Para realizar el ensayo a flexión se utiliza las probetas 2 (0°) y 4 (90°) de cada una de las placas de construcción. La gran diferencia es la unión que existen entre las capas, de forma que en las probetas de fabricadas a 0° la unión entre capas es muy grande, mientras que la sección entre las capas a 90° es muy corta, no obstante, aunque la sección de unión es muy corta existe multitud de capas que realizan esta unión.

Ensayo a flexión	SLS		DMLS		SLM		
	R _{mb} [MPa]	d [mm]	R _{mb} [MPa]	d [mm]	R _{mb} [MPa]	d [mm]	
Placa 1	0°	500	4,35	1859	5,22	-	-
	90°	521	7,21	1189	6,34	-	-
Placa 2	0°	62	0,88	1870	6,07	475	6,82
	90°	59	0,88	1078	2,54	576	6,63
Placa 3	0°	448	4,63	1792	6,15	-	-
	90°	528	4,66	1248	5,42	805	3,09
Placa 4	0°	36	0,27	1780	5,61	260	5,60
	90°	80	0,97	1084	4,69	389	7,85
Media	266,75	2,98	1487	5,26	501	6	

Tabla 4.13: Resultados de los ensayos a flexión. R_{mb} = tensión de rotura, d = desplazamiento vertical

Uno de los parámetros que se evalúan durante el ensayo a flexión es la tensión máxima a flexión (Figura 4.15). Este parámetro se calcula mediante el esfuerzo máximo que es capaz de soportar y viene determinado por la fuerza, la distancia entre apoyos y la inercia de la pieza.

Para simplificar el análisis se divide en función de cada uno de los procesos la explicación correspondiente.

- SLS: El proceso de SLS tiene una tensión de rotura a flexión que va de los 36 a los 528 MPa, con un valor promedio de 266,75MPa. Como se puede ver, la tecnología se ve influenciado sobre todo por la altura de la capa de polvo (P2 y P4) mientras que la potencia y la dirección de construcción se producen pequeñas variaciones en el resultado pero sin tener una influencia tan significativa como la altura.

- DMLS: El proceso de DMLS tiene una tensión de rotura entre 1078 y 1870 MPa con un valor promedio de 1487 MPa. El proceso es influenciado claramente por la dirección de fabricación, obteniendo una disminución de la tensión a 90° del 33% respecto a los mismos parámetros fabricados a 0°, por otro lado, el nivel alto en la velocidad de escaneo hace disminuir la tensión máxima, dando una pequeña variación.
- SLM: El proceso de SLM tiene por resultado, una tensión de rotura entre 260 y 805 MPa con un valor promedio de 501 MPa. Los valores obtenidos mediante este proceso son alrededor de la mitad de los obtenidos mediante el proceso DMLS, por lo que no es de esperar que el proceso con unos parámetros estándar estaría alrededor de la mitad del proceso DMLS. En este caso, no se puede realizar un estudio de la variabilidad del proceso porque no se dispone de la cantidad suficiente de información.

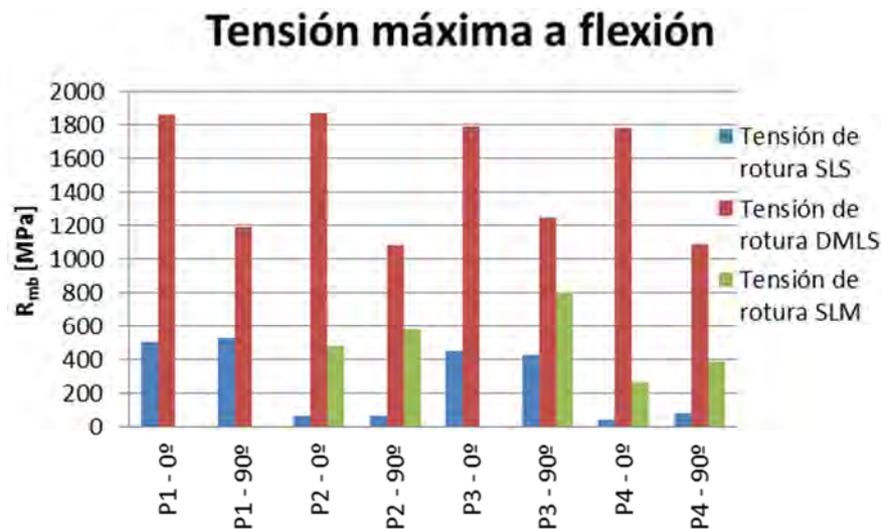


Figura 4.15: Ensayo a flexión: Tensión máxima

Otro de los parámetros estudiados es el desplazamiento vertical que se produce en la pieza debido al esfuerzo del punzón (Figura 4.16), en este caso, también se realiza el análisis teniendo en cuenta los 3 procesos independientes.

- SLS: El proceso de SLS tiene un desplazamiento entre 0,28 y 7,21 mm con un valor medio de 2,98 mm. Al igual que como ocurre en la tensión, el desplazamiento viene determinado mayoritariamente por la altura de la capa de polvo y, en menor medida, por la potencia. La dirección de construcción únicamente tiene influencia en la placa 1.
- DMLS: El proceso de DMLS tiene un desplazamiento entre 2,54 y 6,34 mm con un valor promedio de 5,26 mm. Analizando la gráfica no se puede determinar un

comportamiento de los parámetros de fabricación. Existe un resultado anómalo en la probeta P2.4 donde hay una disminución del desplazamiento muy acentuado, este puede ser causado por un defecto de fabricación o por la concentración de tensiones provocando la rotura de forma inesperada.

- SLM: El proceso de SLM tiene un desplazamiento entre 3,09 y 7,85, el promedio de los valores es de 6mm. No se puede realizar un estudio de la variabilidad, al igual que la tensión de rotura, porque no hay suficientes resultados para determinar una tendencia en las gráficas.

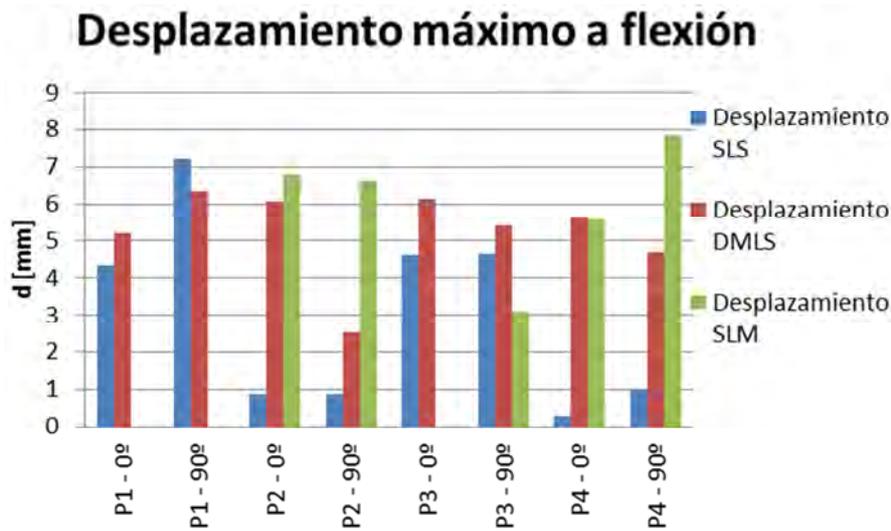


Figura 4.16: Ensayo a flexión: desplazamiento máximo

4.4.6 Tiempo de fabricación

El tiempo de fabricación de las probetas es uno de los factores importantes a la hora de determinar el proceso en que se van a construir las mismas, este representa una parte del precio final de la pieza, además de la inversión inicial de la máquina y el precio del material que se utiliza (Munguía et al., 2009).

El tiempo de fabricación calculado en este apartado es únicamente el tiempo de procesamiento de máquina (Figura 4.17), por lo que los post-procesos que se derivan para obtener las piezas no están calculados. En este apartado, además, solo se tiene en cuenta los parámetros de velocidad de escaneo (o potencia en el caso del proceso SLS) y la altura de la capa de polvo porque la dirección de fabricación se realiza en la misma placa.

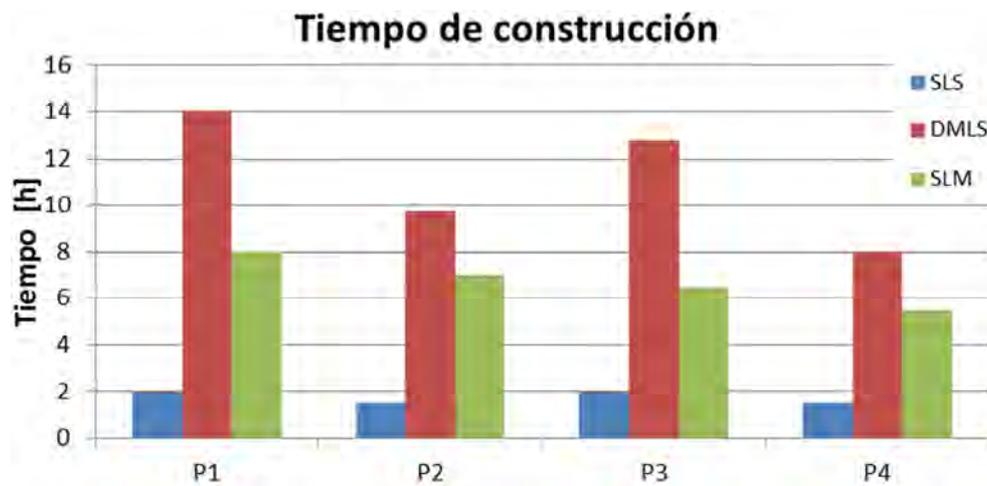


Figura 4.17: Tiempo de construcción

Como se puede observar, el proceso SLS es el más rápido de todos los procesos estudiados, si bien es cierto que necesita de un post procesamiento de infiltración, horneado, que los demás procesos no necesitan. Como se puede observar el proceso únicamente tiene una disminución del tiempo cuando se utiliza un valor alto de la altura de la capa de polvo (P2 y P4), recordando que en este proceso se modifica la potencia del láser en lugar de la velocidad de construcción.

Por el otro lado, el proceso DMLS es el proceso más lento de los tres analizados, en este caso, al contrario del SLM, la altura de capa tiene una mayor influencia que la velocidad de escaneo, de forma que si únicamente se puede modificar un parámetro y se requiere de disminuir el tiempo, este sería modificando la altura de capa. Finalmente, para reducir el tiempo de máquina sería utilizando los dos parámetros a la vez, es decir, utilizando los niveles altos de velocidad de escaneo y de la altura de capa de polvo.

Por último, el proceso SLM está caracterizado por un tiempo de fabricación medio, este se ve influenciado por los distintos parámetros que se han modificado, de forma que la velocidad de escaneo con un nivel alto (P3) tiene una mayor influencia que la altura de capa de polvo con un nivel alto (P2), no obstante, cuando se combinan ambos parámetros es la que permite realizar las piezas más rápido (P4).

La modificación de los parámetros del proceso para aumentar la productividad, y por lo tanto, la disminución del precio de las piezas va en decremento a las cualidades mecánicas y dimensionales de la pieza, tal y como se ha podido observar en los apartados anteriores, por este motivo, es interesante observar cómo afectan los parámetros del proceso para saber cuáles van a ser las propiedades de las piezas que vas a obtener al finalizar.

4.5 Conclusiones

Las principales conclusiones que se desprenden de la caracterización mecánica, dimensional y física de las probetas de ensayo a tracción, flexión y porosidad fabricadas en SLS, DMLS y SLM se detallan en una tabla resumen (Tabla 4.14) para mostrar la optimización de los valores según la tecnología analizada. La optimización sólo es posible realizarla dentro del rango de los experimentos realizados, por lo que no es posible determinar el comportamiento fuera de este rango.

Proceso	SLS			DMLS			SLM			
Dimensional	L2	P1	0°	L1	V1	90°	L1	V2	0°	
Porosidad	L2	P2		L2	V2		L1	V1		
Rugosidad	L2	P1	90°	L1	V1	0°	L1	V2	90°	
Tracción	R _{mt}	L1	P1	90°	L1	V2	90°	L1	V1	90°
	E _t	L1	P1	0°	L2	V2	0°	L1	V1	90°
	e	L1	P1	90°	L1	V2	90°	L1	V1	0°
Flexión	R _{mt}	L1	P1	90°	L2	V1	0°	L1	V2	90°
	e	L1	P1	90°	L2	V1	90°	L2	V2	90°
Tiempo	L2			L2	V2		L2	V2		

Tabla 4.14: Conclusiones de la optimización de los parámetros según salida. Nivel bajo (1), nivel alto (2), grosor de capa (L), velocidad de escaneo (V), potencia (P) y dirección de fabricación (0° o 90°)

Como se puede observar, cada una de las salidas analizadas tiene su correspondiente nivel de grosor de capa (L), velocidad de escaneo (V) para DMLS y SLM o potencia (P) para el caso de SLS y finalmente, en algunos casos, la dirección de fabricación. La tabla nos da un resumen de que existe una gran dificultad de mejorar todas las características de la piezas final, por lo que, si se quiere mejorar una propiedad estará comprometiendo el

comportamiento de otra. Existe una gran influencia del parámetro dirección de fabricación entre las distintas propiedades analizadas debido al proceso discontinuo del proceso.

A continuación se resume las tendencias e influencias que se han observado de los experimentos realizados.

- La composición química de los 3 procesos estudiados tienen una gran variabilidad entre procesos, por lo que no es posible comparar los resultados obtenidos entre ellos. No obstante, se puede realizar la comparación entre el mismo proceso de fabricación.
- Gran repetibilidad dimensional de la tecnología DMLS en la realización de piezas, sobretodo, en la altura.
- Los parámetros estándar del proceso dan, en mayor medida, una buena respuesta en los distintos parámetros estudiados, no obstante, existen algunas modificaciones de los valores de los parámetros estándar que permiten mejorar únicamente un comportamiento.
- Las propiedades mecánicas a tracción y la porosidad tiene un comportamiento similar en SLM, mientras la porosidad aumenta las propiedades disminuyen. En el caso de la tecnología DMLS, la porosidad y las propiedades a tracción no siguen el mismo comportamiento.
- La rugosidad superficial de los procesos DMLS y SLM se ven influenciados por la dirección de fabricación y además, son opuestas entre ellas.
- Los procesos de SLS y DMLS se comportan como materiales frágiles, con poca deformación, mientras que el proceso SLM tiene un comportamiento similar a un material dúctil.
- Un grosor de capa bajo, en el proceso SLS, es de vital importancia para tener una buena unión entre capas y poder soportar los esfuerzos a flexión, mientras que en la tecnología DMLS es la dirección de fabricación.
- El tiempo de fabricación entre procesos es muy distinto debido al sistema de unión entre capas. El proceso que se ve influenciado más por uno de los dos factores que intervienen es el proceso DMLS, con la altura de capa, debido a la velocidad en que se reparte el polvo.

Capítulo 5. Proceso tradicional vs proceso SLM

El proceso de fabricación tradicional tiene una gran aceptación en la sociedad, si bien es cierto que tiene grandes inconvenientes a la hora de la fabricación de piezas complejas, en el presente capítulo, se estudia si las piezas fabricadas mediante el proceso SLM pueden substituir, teniendo en cuenta únicamente las propiedades mecánicas, las piezas fabricadas con un proceso tradicional.

5.1 Introducción

Con la introducción de las tecnologías aditivas se abre un nuevo mercado de negocio con la personalización de los productos y reduciendo el tiempo de ciclo, es decir, el tiempo desde el diseño hasta la introducción del producto en el mercado. Además soluciona algunos de los problemas o limitaciones que tienen los procesos tradicionales.

Uno de los grandes inconvenientes de este tipo de tecnologías es el camino que ha recorrido hasta la actualidad. Des de la aparición de la primera máquina comercial, en el 1986, las piezas que se fabricaban eran utilizadas únicamente como prototipos, porque se utilizaban para observar el diseño final y no tenían que soportar ningún tipo de esfuerzo.

Durante estos últimos años, la tecnología aditiva se ha convertido en una de las tecnologías donde más se ha evolucionado y la mejora de los distintos procesos ha permitido que actualmente puedan soportar altas propiedades mecánicas. Sin embargo, el principal problema que existe en la sociedad es que la mayoría de gente conoce y utiliza la tecnología como prototipo mientras que este concepto ha evolucionado a día de hoy.

Ghany et al. (Ghany & Moustafa, 2006) en el 2006 ya afirmaba que las piezas fabricadas mediante la fundición de capas, en lugar de sinterización, eran más resistentes y básicamente el esfuerzo que pueden soportar depende de la aleación del material y de los parámetros utilizados durante el proceso.

Sin embargo, a pesar de que la tecnología de adición ha evolucionado, también es cierto que los productos que se deben fabricar, utilizando estos procesos de adición, deben tener unas características muy específicas, como por ejemplo, la personalización del producto (sector de la salud), series muy cortas (industria aeroespacial, competición) o donde la utilización de moldes no sea rentable (Kim & Oh, 2008).

En el capítulo anterior se ha estudiado cómo afecta la variación de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas y dimensionales en piezas con una geometría de probeta y se ha observado que variando estos parámetros establecidos por los comerciales va en decremento de las propiedades mecánicas. En este capítulo se estudia el comportamiento a tracción, compresión y flexión de piezas reales fabricadas mediante procesos tradicionales y comparadas con piezas fabricadas en SLM, es decir, por uno de los procesos de adición de capas.

5.2 Procedimiento

El procedimiento para realizar la experimentación consta de dos partes, por un lado la obtención de las geometrías de las piezas convencionales y, por el otro lado, la fabricación a través del proceso de adición de capas. Este proceso aditivo debe utilizar el mismo material que las piezas convencionales, o lo más parecido posible, para poder comparar los distintos procesos, es decir, se pretende que durante los distintos ensayos únicamente exista el proceso de fabricación como diferencia.

5.2.1 Obtención de la geometría

En la experimentación se compara el comportamiento de 4 piezas reales (Figura 5.1) fabricadas por procesos tradicionales. Las piezas escogidas constan de un mosquetón de

seguridad (Wizard, ref.2480), un mosquetón náutico (Plastimo, ref. 29751), de un soporte para rueda (Amig, ref. 6746) y una escuadra (Amig, ref. 8781).



Figura 5.1: Piezas reales a) mosquetón de seguridad b) mosquetón náutico c) soporte rueda d) escuadra

La geometría de cada una de las piezas nos permite diferenciar básicamente el método de obtención, por un lado, el mosquetón de seguridad y el mosquetón náutico están fabricados por fundición y, por el otro lado, el soporte de la rueda y la escuadra están fabricados por estampación y doblado.

Existen básicamente dos características principales para escoger las piezas a ensayar, todas están realizadas con acero inoxidable 316L y, además, las geometrías y las dimensiones son óptimas para ser fabricadas mediante la tecnología aditiva.

Para obtener la geometría de las piezas comerciales se ha utilizado una máquina de digitalización 3D Sidio Triple Advance, que permite capturar las coordenadas cartesianas de la superficie de la pieza real y poder obtener las réplicas de la geometría.

El proceso de digitalización se utiliza para obtener a través de la ingeniería inversa la geometría de la pieza (Figura 5.2a). Para la digitalización es necesario proyectar una serie de luces preestablecidas en la superficie de la pieza y unas cámaras capturan las deformaciones. Una vez capturadas estas deformaciones, el programa tiene una nube de puntos, en este caso unos 300.000 puntos por modelo, que son transformados en una superficie (Figura 5.2b) con la utilización del RapidForm XO Redesign® y con una tolerancia inferior a las 25 micras. La superficie generada es convertida en un modelo 3D (Figura 5.2c) y finalmente este modelo es convertido en formato StL. Este procedimiento se ha realizado para cada uno de los 4 modelos.

Como se puede observar en la pieza convencional del mosquetón, se ha eliminado partes de la pieza que no tienen ningún efecto en el comportamiento mecánico que se quiere analizar, esto también ocurre en el mosquetón náutico, que se ha eliminado la tuerca que permite abrir y cerrar para poder introducir los elementos a soportar.

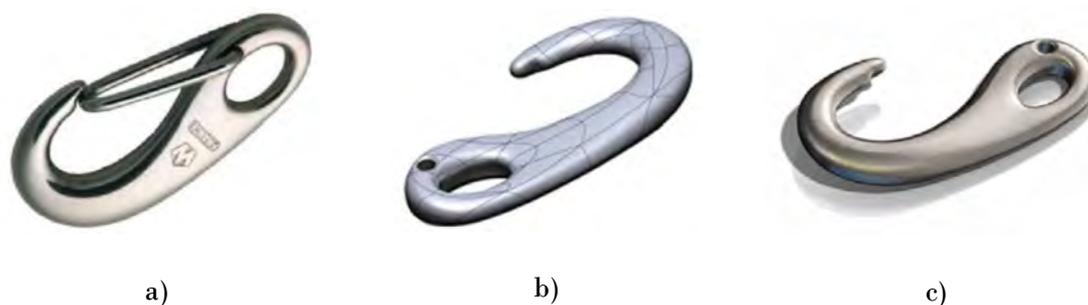


Figura 5.2: Proceso de digitalización mosquetón de seguridad: a) real b) superficie c) modelo 3D

5.2.2 Material y fabricación de las piezas

Durante la aparición de la tecnología varios autores han estudiado las propiedades mecánicas, la composición química, la microestructura del acero inoxidable y también los errores dimensionales de las piezas fabricadas con el proceso SLM.

Para determinar la composición química de ambos materiales se realizó 3 análisis de fluorescencia de rayos X mediante un microscopio de escaneo de electrones (EDX) con la máquina Zeiss DSM-960A. El EDX es una técnica analítica utilizada para el análisis elemental de los elementos químicos que integran la muestra. En la Tabla 5.1 se muestra la composición química de los dos mosquetones de seguridad, uno fabricado mediante el proceso convencional y el otro con SLM. Además, en la tabla sale la composición que debería tener el material, según normativa, para considerarse acero inoxidable 316L. Durante la experimentación se ha considerado que las otras piezas fabricadas mediante procesos convencionales tienen la misma composición.

Tecnología	C	Si	Mn	Fe	Cr	Mo	Ni	S
Tradicional	4,49	0,35	1,54	66,65	15,41	1,91	9,62	0,01
SLM	4,48	0,53	0,5	64,77	15,76	2,47	11,5	0
Normativa	≤0,07	≤1,00	≤2,00		16,5-18,5	2-2,5	10,5-13,5	≤0,03

Tabla 5.1: Composición química del acero inoxidable AISI 316L tradicional, CL20ES SLM y normativa (Delgado et al., 2011)

La máquina M3 Linear de la compañía Concept Laser es utilizada para realizar las piezas mediante SLM, el proceso de SLM es reconocido con el nombre de Laser Cusing. La compañía comercializa varios tipos de material, entre ellos se encuentra el CL20ES, este nombre comercial designa el acero inoxidable en polvo y, por lo tanto, se encuentra dentro

del rango para considerarse acero inoxidable 316L, el mismo material que se utiliza para realizar las piezas convencionales que se van a ensayar durante la experimentación.

EL proceso SLM (Tabla 5.2) utiliza un láser de 100 W bombeado mediante diodos de Nd:YAG, la máquina tiene un control de la atmosfera, donde no se permite que se exceda del 0,5% de oxígeno, a través de nitrógeno para evitar la oxidación. De acuerdo con el fabricante, la máquina tiene una precisión de 15 micras dentro de la área de construcción de 300x350x300 mm y además asegura una densidad de casi el 100% utilizando los parámetros estándares del proceso.

La estrategia de barrido damero, utilizada durante la experimentación, consiste en dividir la capa a sinterizar en cuadrados de 5 mm. Cada uno de los cuadrados que se generan se rellena de forma que los vectores son paralelos entre ellos, una vez se cambia de cuadrado adyacente, el vector cambia a 90°, de forma que se observa en la superficie la geometría de un juego de ajedrez. Si la siguiente capa tiene que rellenar la misma área, las direcciones no coinciden con la capa anterior para aumentar las propiedades mecánicas.

Parámetros	
Tecnología	SLM laser cusing
Modelo	M3 Linear de Concept Laser GmbH
Tipo de láser	Diodos Nd: YAG (1064 nm)
Potencia	100W
Diámetro haz	100 micras
Estrategia de escaneo	Damero
Atmosfera	Nitrógeno
Velocidad de escaneo	7 m/s
Precisión	15 micras
Material utilizado	1.4404/316L/CL20ES

Tabla 5.2: Parámetros de fabricación. Fuente: (Delgado et al., 2011)

Las piezas son orientadas dentro de la máquina (Figura 5.3) optimizando la cantidad de soportes a generar y reducir el tiempo de post-procesamiento. En este caso no se ha tenido en cuenta que las propiedades mecánicas varían según la dirección de fabricación debido a que es un proceso discontinuo, además, la cohesión entre capas y la misma capa es distinta. Los post-procesos realizados después de la fabricación se limitan únicamente a eliminar los soportes, por lo que no se realiza ningún tratamiento para aumentar las propiedades mecánicas o disminuir la rugosidad superficial.

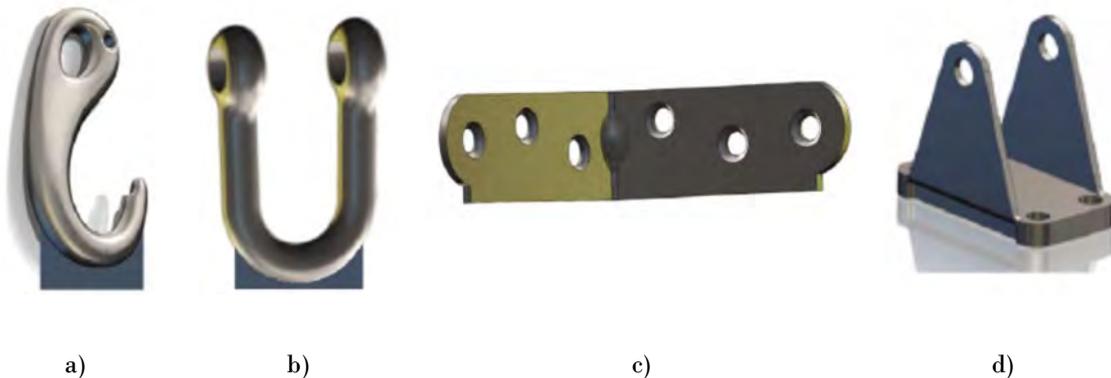


Figura 5.3: Soportes generados a) mosquetón de seguridad b) mosquetón náutico c) soporte rueda d) escuadra

5.3 Ensayo

Los ensayos que se realizan en este apartado de la experimentación no siguen ninguna normativa estandarizada, por lo que se fija una velocidad del cabezal es de 5 mm/min para todos los experimentos y se va capturando la fuerza y la deformación cada 500 milisegundos. Todos los ensayos se han realizado con la máquina de ensayo universal Autograph AG-IS de la empresa Shimadzu y sin la utilización de extensómetros. La máquina de ensayo universal está equipada con una célula de 50 kN que permite calcular la fuerza y la elongación de la pieza, mientras que en el otro extremo, existen dos configuraciones de cabezales según el ensayo a realizar, de esta forma, para los ensayos a tracción y compresión se utiliza un cabezal móvil y para realizar los ensayos a flexión se utiliza el cabezal fijo.

5.3.1 Tracción

El ensayo con el mosquetón de seguridad se ha utilizado para comparar el resultado entre un mosquetón fabricado mediante forja y el proceso de SLM, de forma que nos permite observar el comportamiento mecánico a tracción. El ensayo de tracción (Figura 5.4) utiliza 2 pernos los cuales se han cambiado en cada ensayo y evitar posibles variaciones en los resultados del experimento.

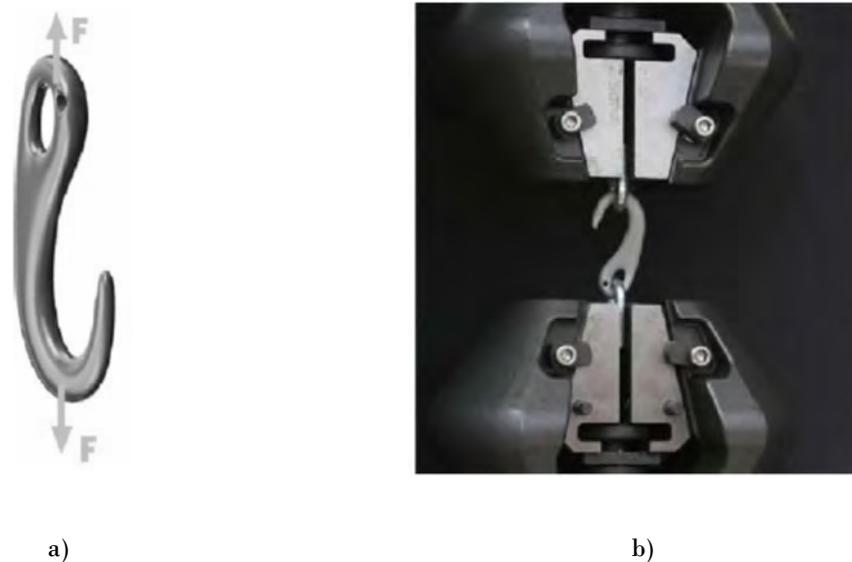


Figura 5.4: Ensayo mosquetón de seguridad a) esquema b) real

Además, como se ha comentado, se ha eliminado aquellas partes que no tienen una influencia en el ensayo. En este caso, se ha eliminado el cierre de seguridad, ya que este únicamente no permite que el elemento que está dentro del mosquetón pueda salir de forma libre.

El ensayo del mosquetón a tracción termina hasta que el programa de la máquina universal de ensayos captura que hay una debilitación de la pieza, es decir, que se ha fracturado. La fractura es determinada cuando hay una disminución brusca del 10% de la fuerza que estaba aplicando hasta el momento.

5.3.2 Compresión - Flexión

El ensayo del mosquetón náutico es un ensayo a compresión (Figura 5.5), se compara el comportamiento del producto fabricado mediante forja con el producto fabricado mediante SLM. En el ensayo se ha eliminado el perno que asegura el cierre y se ha introducido dos ejes que comprimen el mosquetón náutico por las dos alas, además, en la pieza fabricada por SLM no se ha fabricado la rosca que permite cerrar el perno ya que no tiene una influencia en el comportamiento.



Figura 5.5: Ensayo mosquetón náutico a) esquema b) real

El ensayo del mosquetón náutico a compresión termina cuando el cabezal superior se ha desplazado verticalmente 8,5 mm, dejando un espacio para que las dos alas del mosquetón no colisionen entre sí. Los ejes que realizan el movimiento a compresión no se cambian durante los dos experimentos porque no existe una debilitación de estos.

Durante el ensayo a compresión, la pieza se comporta a flexión, donde la parte interna de la pieza trabaja a compresión y la parte externa trabaja a tracción, en la parte interna de la pieza, se encuentra la fibra neutra, donde no existe tensión.

La realización del ensayo a compresión del mosquetón náutico se analiza y compara el comportamiento a flexión de las piezas fabricadas por forja y por SLM, en este caso, no es un esfuerzo natural que recibe este producto.

5.3.3 Compresión

El ensayo a compresión que se realiza en el soporte de la rueda (Figura 5.6) sirve para comprobar cómo afecta la compresión pura en un producto de un proceso tradicional con el SLM. El proceso tradicional utilizado para conseguir la pieza es la estampación y el doblado.

En el ensayo se realiza una simulación del esfuerzo que recibe el soporte de la rueda a través del eje que aguanta la propia rueda. Para simular el esfuerzo que recibe el soporte, se ha sustituido estos dos elementos por un eje y por un bloque de hierro, el cual hace una distribución uniforme de la fuerza a lo largo del eje. El eje está sujetado por dos alas que son las que reciben la compresión.

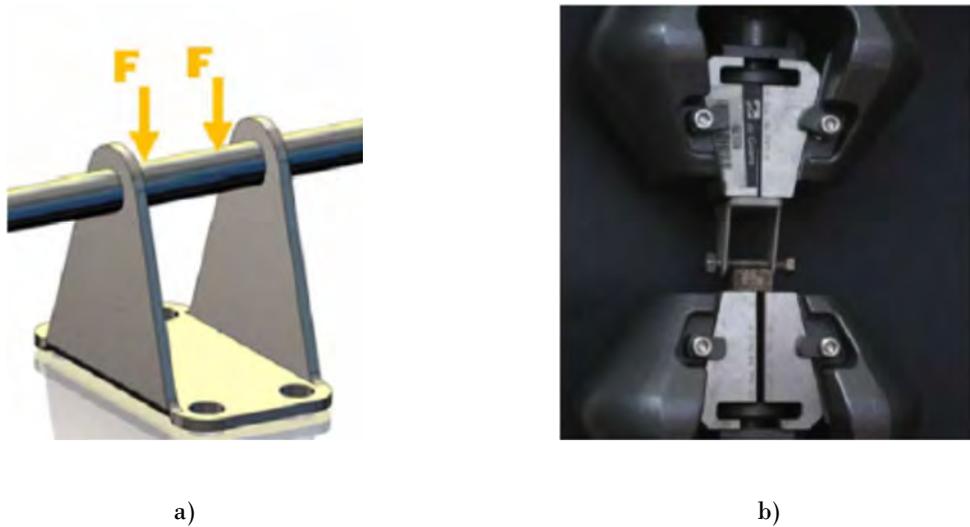


Figura 5.6: Ensayo soporte rueda a) esquema b) real

El ensayo termina cuando la célula de fuerza detecta que se ha disminuido el 10% de la fuerza, al igual que el ensayo a tracción, simulando una rotura de la parte. Uno de los posibles problemas que pueden ocurrir con esta limitación es que el soporte se haya deformado lo suficiente como para que la rueda no pueda moverse dentro del soporte y que todavía no exista la disminución de la fuerza.

La única diferencia que existe entre la pieza fabricada mediante el proceso tradicional y el SLM es que los soportes que se han generado debajo de la base no se han eliminado porque no tienen un efecto en las alas de la pieza.

5.3.4 Flexión

El ensayo a flexión con la escuadra (Figura 5.7) se usa para analizar la diferencia entre la resistencia a flexión del proceso tradicional (estampación, doblado y marcado) con el proceso de SLM. Para realizar el ensayo, una de las alas de la escuadra está fijada con 3 tornillos, como si estuviese fijado en la pared, en la otra ala, se somete a una fuerza puntual a compresión a través de un eje. El eje transmite la fuerza puntual en la escuadra el cual le realiza una tensión a flexión.

El ensayo se termina cuando el eje sale del cabezal cilíndrico fijo, esto acontece cuando el cabezal baja más de 12 mm (aproximadamente unos 20°), esto significa que la pieza se ha deformado lo suficiente como para que la geometría ya no sea la correcta como para trabajar adecuadamente, aun así, es la célula de fuerza que determina que el experimento ha terminado. Esta limitación se realiza para poder controlar que la máquina para si se produce una rotura antes de conseguir la deformación.

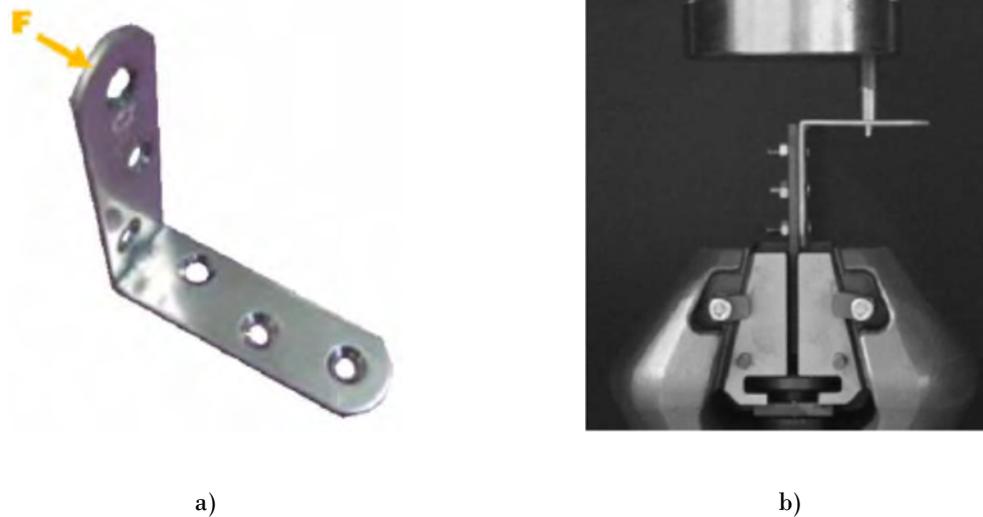


Figura 5.7: Ensayo de la escuadra a) esquema b) real

5.4 Resultados

En este apartado se estudia el comportamiento mecánico (fuerza-deformación) de cada uno de los experimentos y se compara con los resultados de ambos procesos de fabricación, es decir, el tradicional y el SLM. Según los resultados de los ensayos, se pueden utilizar para afirmar o no que la tecnología mediante adición de capas, concretamente la SLM utilizada y con el material utilizado, es apta para usarse como pieza final y de uso general.

Para realizar esta comparación se contrastan los dos procesos en una misma gráfica de fuerza – deformación, además, se realiza una imagen del experimento una vez se ha finalizado.

5.4.1 Tracción

En la Figura 5.8a presenta el ensayo a tracción realizado en el mosquetón de seguridad. En el primer tramo del experimento, hasta deformaciones de 1mm (2,25kN), las dos piezas tienen un comportamiento muy lineal y parecido, una vez sobrepasado esta deformación, el mosquetón de seguridad fabricado mediante SLM presenta un comportamiento lineal hasta una fuerza de 4 kN, mientras que el tradicional empieza a deformarse. Las fuerzas máximas que soportan el proceso SLM y el proceso tradicional son

conexiones entre granos en todas las direcciones, por lo que no existe una alineación en uno de los ejes, por esta razón, el comportamiento es mejor que el producido mediante forja.

En la Figura 5.8a también se observa el comportamiento regular del proceso tradicional, mientras que el comportamiento de SLM la continuidad de la gráfica no es constante, estos saltos es debido al movimiento del mosquetón con los pernos en U, ya que la pieza no ha sido pulida y por lo cual, los movimientos entre los elementos son bruscos e incontrolables.

5.4.2 Compresión - Flexión

En la Figura 5.9a se muestra el ensayo a compresión/flexión de dos mosquetones náuticos fabricados con dos tipos de procesos distintos, en un caso fabricado mediante forja y el otro mediante SLM. En ambos existe un comportamiento lineal en los dos mosquetones, si bien es cierto que existe una gran diferencia entre los dos procesos, por lo que el SLM tiene un comportamiento más pronunciado (4,3 kN con 1,75 mm) que el fabricado mediante forja (2,2 kN con 7 mm). La máxima fuerza que soporta el mosquetón náutico mediante SLM es de 4,7 kN mientras que el fabricado por forja soporta la mitad de la fuerza (2,42 kN).

Como se ha comentado en el ensayo, el experimento se detiene a una deformación de 8,5 mm debido a que la distancia entre alas es de 10 mm. Se puede observar que la deformación del mosquetón náutico a 8,5 mm mediante forja (Figura 5.9b) y mediante SLM (Figura 5.9c) tiene una deformación muy parecida.

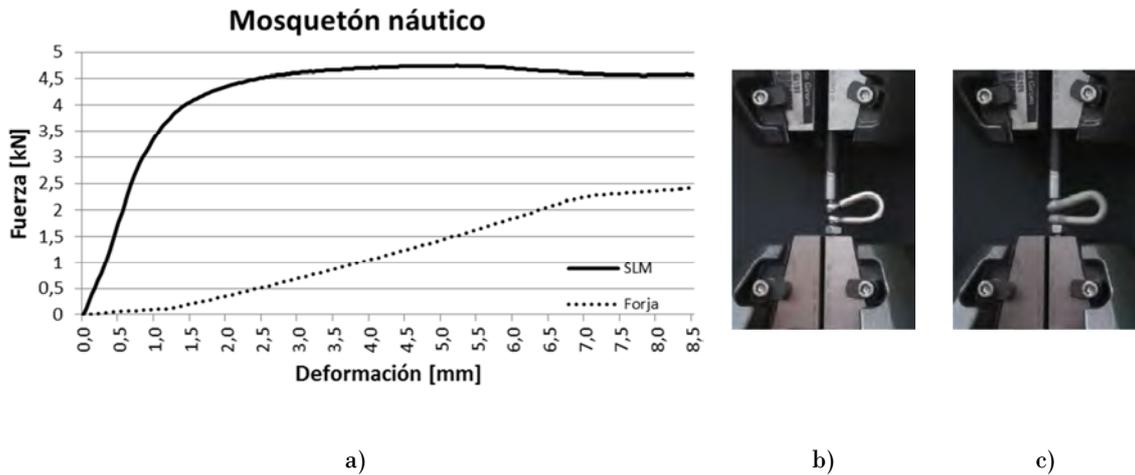


Figura 5.9: Resultado mosquetón náutico a) gráfica b) tradicional c) SLM

El mosquetón náutico fabricado con SLM soporta una mayor fuerza a compresión que la pieza fabricada con forja. La fuerza a compresión está relacionada con la flexión, esto significa que el proceso SLM tiene un comportamiento mejor en los ensayos a flexión que el proceso de forja.

La estructura del material realizado mediante forja es alineada a través de la geometría del mosquetón náutico, por lo tanto, la estructura del material sigue la pieza y, al no realizarse un esfuerzo con las aplicaciones más comunes de trabajo, el resultado de esta parte es mucho inferior a la obtenida por SLM, ya que esta parte, al igual que la del mosquetón de seguridad tienen una conexión entre partículas de forma tridimensional, por lo que no las propiedades del material es mayor en todas las direcciones.

5.4.3 Compresión

La comparación del comportamiento mecánico de la fuerza vs deformación (Figura 5.10a) del soporte de la rueda fabricado con la estampación y el siguiente doblado es comparado con el comportamiento de la misma pieza realizada con SLM.

Como se puede observar en la gráfica, los dos soportes para la rueda tienen un comportamiento muy similar hasta que se aplica una deformación de 3 mm o hasta unos 8 kN. La inflexión del ensayo aparece cuando el proceso tradicional empieza a perder la geometría y se empieza a doblar, perdiendo la función por la que se ha realizado la pieza (Figura 5.10b). En el caso del soporte de la rueda realizada fabricada con SLM, el comportamiento continúa hasta 10,9 kN. El ensayo de SLM finaliza (Figura 5.10c) cuando el eje se rompe y se puede observar que no existe una deformación significativa entre las paredes del soporte.

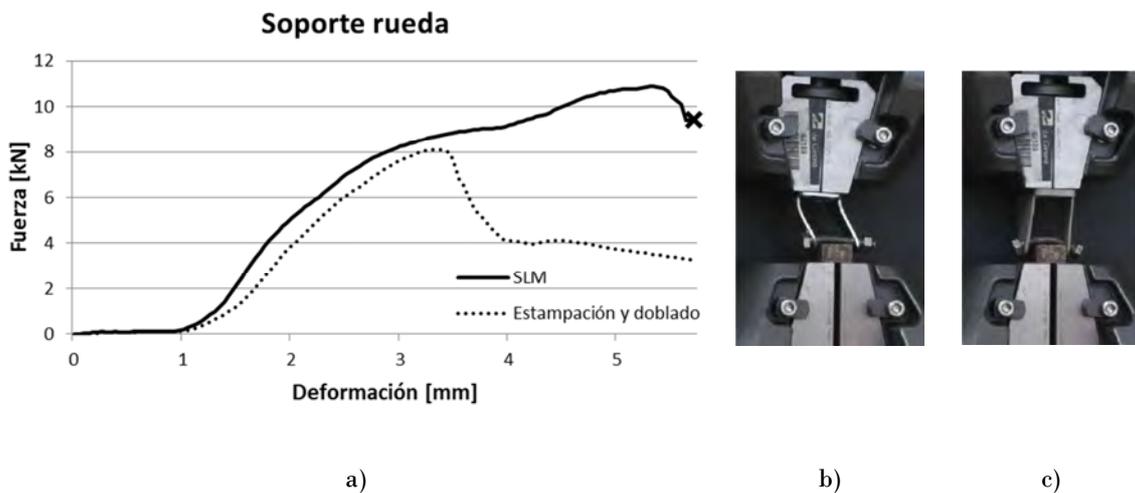


Figura 5.10: Resultado soporte rueda a) gráfica b) tradicional c) SLM

El soporte para rueda fabricado con SLM soporta una mayor fuerza a compresión que la utilizada con un proceso tradicional. El ensayo en SLM se termina porque rompe el eje, en el caso del proceso tradicional, este rompe debido a que hay una deformación en las paredes y se considera que finaliza su funcionalidad.

La debilitación del proceso tradicional empieza a partir de una deformación de 3 mm y con una fuerza de 8 kN, en este punto, las paredes verticales empiezan a ceder y a perder su geometría debido a que la zona de doblado tiene una debilitación debido al mismo proceso de fabricación y, además, una pequeña desviación de estas paredes provoca que la fuerza no sea completamente a compresión y que la deformación a flexión vaya aumentando. En el soporte de la rueda fabricado mediante SLM, aunque exista una desviación de las paredes, no existe una debilitación inicial debido al propio proceso.

5.4.4 Flexión

La Figura 5.11a compara el comportamiento fuerza - deformación de la escuadra fabricada mediante un proceso tradicional y con el SLM. El comportamiento de las dos piezas se mantiene constante hasta aproximadamente 1,25 mm de desplazamiento o unos 100 N de fuerza, esta fuerza es a compresión y se convierte a flexión a través del voladizo del ala. Una vez sobrepasado este punto, el proceso tradicional empieza a tener un comportamiento mecánico inferior al SLM.

La máxima fuerza que puede soportar una escuadra fabricada mediante SLM es de 506 N mientras que la fuerza máxima que llega a soportar la pieza fabricada por el proceso tradicional es de 345 N. El ensayo termina cuando el cabezal fijo ha bajado 12mm, por lo que no se puede conocer el comportamiento de las piezas una vez se ha sobrepasado este desplazamiento. En ambos casos, tanto en la escuadra realizada por estampación y doblado (Figura 5.11b) como en la fabricada por SLM (Figura 5.11c), la deformación del ángulo empieza en la primera tuerca que representa la unión con la pared.

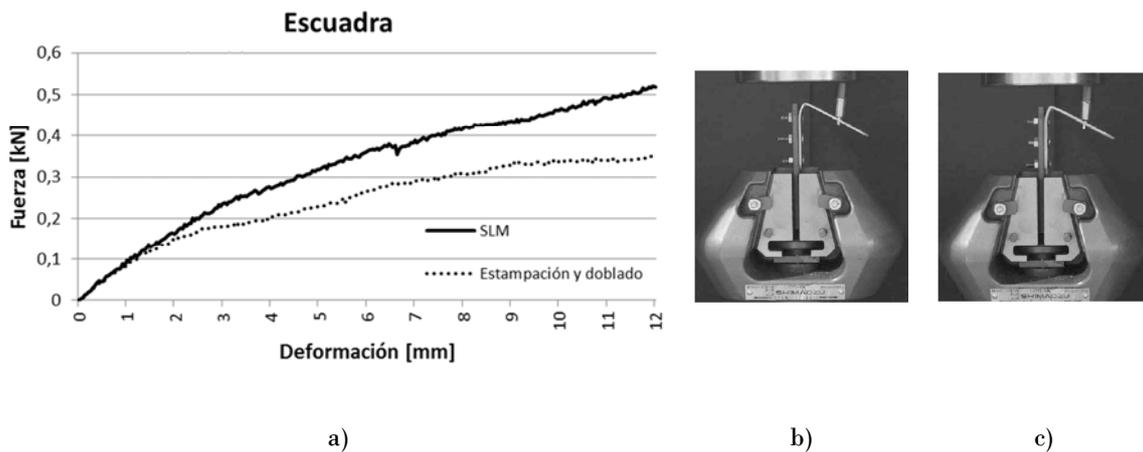


Figura 5.11: Resultado soporte rueda a) gráfica b) tradicional c) SLM

La escuadra realizada con SLM es más robusta que la fabricada con el proceso tradicional, al igual que el soporte de la rueda, el proceso tradicional se realiza inicialmente una estampación con la geometría y después se realiza el doblado, disminuyendo la

resistencia en el córner. En el caso de la pieza realizada por SLM existe únicamente la pretensión a compresión debido a los gradientes térmicos, esta pretensión a compresión ayuda a soportar un esfuerzo en la pieza.

Si se observa la gráfica esta no se comporta de forma continua, esto es debido al movimiento que existe entre el eje y el cabezal fijo. Cuando el ala de la escuadra empieza a deformarse, se desplaza el eje con el cabezal de forma inesperada y, finalmente, provoca que el eje salga del límite del cabezal, finalizando así el experimenton.

5.5 Conclusiones

La única variación que existe entre cada uno de los ensayos que se realiza en el capítulo es el proceso de obtención de la pieza, por un lado, el proceso de adición y, por el otro, a través del proceso tradicional

Las piezas fabricadas utilizando el proceso de adición de capas son más adecuadas para soportar las tensiones de las fuerzas a tracción y compresión y, además, tienen una mejor respuesta en la deformación comparada con el proceso tradicional de fabricación, tales como el forjado y la estampación-doblado.

Por este motivo, es necesario entender que las investigaciones realizadas desde la aparición de la primera tecnología hasta la actualidad han permitido mejorar las propiedades mecánicas. Estos cambios realizados por los desarrolladores de tecnología deben hacer cambiar la mentalidad de la sociedad y dejar de pensar que las piezas fabricadas por tecnologías aditivas tiene un comportamiento inferior a las fabricadas de forma tradicional.

El comportamiento se demuestra a través de 4 ensayos de piezas reales con distintos tipologías de ensayo, tensión, compresión y flexión. Obviamente, este no significa que el mejor proceso para la fabricación de estas piezas sea el proceso SLM, porque no se entra en términos económicos, cantidad de piezas a fabricar y el tiempo que es necesario introducir el producto en el mercado, etc...

Durante este capítulo, se puede observar que la tecnología SLM es más robusta que las piezas fabricadas de forma tradicional y que además, el tiempo para realizar una pieza desde el diseño hasta obtenerla es inferior, ya que en el proceso tradicional, se requiere de moldes y matrices y realizar la puesta a punto de las máquinas que intervienen en el proceso, por el otro lado, únicamente es necesario enviar la pieza a máquina y fabricarla. Una de las ventajas del proceso SLM es que las variaciones en el diseño o personalizaciones solo intervienen en el tiempo de diseño, mientras que en los procesos tradicionales se utiliza la estandarización de piezas por la dificultad de introducir estas personalizaciones.

También es cierto que se no todas las tecnologías por adición tienen un mismo comportamiento, que estas dependen del material, de los parámetros utilizados y de los componentes en que se realice el proceso, esto significa que es necesario estudiar cada uno de los procesos específicamente para afirmar que las piezas fabricadas pueden substituir a piezas fabricadas de forma tradicional, además, existen otros parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de sacar una pieza al mercado y que no han sido estudiados, como puede ser los ensayos de corrosión, impacto, torsión y fatiga.

Otro aspecto a tener en cuenta son los relacionados con los post-procesos que se pueden realizar en las piezas de SLM, como pueden ser los tratamientos térmicos para modificar las propiedades, el mecanizado u otros procesos de acabado, donde no se sabe cómo puede afectar en las propiedades mecánicas del producto final.

Capítulo 6. El diseño en tecnologías AM: un caso práctico

En el presente capítulo se realiza un caso de estudio real en el sector biomédico, un sector innovador y de alto valor añadido. El proceso de fabricación mediante tecnologías de AM, y concretamente SLM, ha cambiado el paradigma de fabricación, donde el diseñador tiene que centrarse únicamente en el tratamiento de la información y en el diseño personalizado del producto.

6.1 Introducción

El ameloblastoma es un tumor odontológico benigno de origen epitelial sin inducción en el tejido conectivo, pero que tiene un comportamiento localmente agresivo. El ameloblastoma se ha clasificado en tres grupos diferentes según el tipo clínico: sólido o multiquístico, unikuístico y periférico (Kramer et al., 1992). En general, es localizado en un 80% de los casos en la mandíbula y en un 20% en la maxila y representa aproximadamente un 10% de todos los tumores mandibulares odontogénicos (Torres et al., 2005). El diagnóstico aparece mayoritariamente entre la tercera y la quinta década de vida sin ninguna predilección respecto al sexo. En la elección del tratamiento de los ameloblastomas se debe valorar el tipo clínico, la localización y el tamaño del tumor, así como la edad del

paciente, dando así un riesgo de recurrencia en el caso de una intervención conservativa (cistectomía, enucleación) del 22,6% y en el caso del tratamiento radical, se debe hacer una resección mínima de 1cm de la parte sana dando así un riesgo de recurrencia del 17,7% (Reichart et al., 1995). Aunque se están realizando otros tratamientos como la quimioterapia para tratar de eliminar el tumor, todavía no se ha demostrado que sea un tratamiento totalmente efectivo (Philip et al., 2005).

En el caso de la intervención radical los cirujanos tienen que unir las dos partes seccionadas con una placa y con tornillos, o bien, si el área de afectación es muy grande, se tiene que definir una prótesis para usarla como sustitución de la parte afectada por el ameloblastoma. El cirujano tiene que definir la pieza, con una alta complejidad geométrica, a través de la tomografía computarizada (CT) del paciente o bien a través de la resonancia magnética (RM). Por esta razón, la metodología que debe usar actualmente el cirujano no es lo suficientemente precisa y, por lo tanto, la placa o prótesis no se ajusta correctamente en el paciente, debiéndola modificar *in situ* hasta conseguir el ajuste deseado, aumentando el riesgo operatorio, el tiempo de operación, la incertidumbre del resultado final y disminuyendo las propiedades mecánicas por fatiga.

No obstante, existe software libre como InVesalius (CTI, 2012) para tratar las imágenes médicas y convertirlas en imágenes en 3D, dando así una visión y abastecimiento de la infección, facilitando también el procedimiento de la intervención y disminuyendo la incertidumbre del cirujano. Además, el software permite observar las distintas estructuras anatómicas del cuerpo por separado, por ejemplo el hueso (cortical y trabecular), el tejido dental (dentina y esmalte), los músculos y ligamentos, los nervios y los vasos sanguíneos (Piloto et al., 2008) entre otros. El mismo software permite la exportación de la geometría en formato StL para que las máquinas de adición de capas puedan fabricar los modelos en un objeto sólido, apoyando así a los cirujanos.

Como se ha visto en el capítulo anterior, con las mejoras realizadas en la tecnología durante los últimos años (Wholers report, 2009), se obtienen piezas con propiedades mecánicas superiores a las fabricadas con un proceso tradicional, cambiando así el concepto de prototipo por el de pieza final (Delgado et al., 2011). Asimismo, la tecnología permite obtener el modelo en relativamente poco tiempo obteniendo así la personalización del producto (Kim & Oh, 2008) tal y como se necesita en el caso biomédico de prótesis.

En este punto, el cirujano puede: (i) hacer una placa para juntar las dos partes del hueso que han sido cortadas, esta placa puede ser deformada haciendo una réplica de la geometría del paciente a través de un prototipo del paciente (Sannomiya et al., 2008): o bien (ii) si el ameloblastoma tiene un área mayor, se puede realizar la fabricación de la prótesis con un material biocompatible. Antes de realizar la fabricación, es necesario realizar simulaciones mediante el análisis con elementos finitos (FEA) para evaluar los resultados de tensión, deformación y desplazamiento para rediseñar, optimizar y mejorar el modelo hasta producir el diseño final.

6.2 Metodología

El estudio realizado es un caso real de una paciente brasileña de 42 años de edad que está afectada por un ameloblastoma en la parte derecha de la mandíbula. Según el diagnóstico del doctor es necesario remover la mitad de la mandíbula debido a que tiene una afectación muy grande y poder evitar así una reaparición del ameloblastoma.

La metodología para hacer la substitución de la mandíbula afectada por ameloblastoma por una prótesis personalizada se divide en 5 apartados: (1) obtención de la geometría 3D a través de los datos obtenidos por el CT, (2) obtención de la mandíbula ósea, (3) diseño de la prótesis, (4) simulación del comportamiento de la prótesis con el hueso, y (5) fabricación y evaluación de la prótesis de mandíbula.

A pesar de la fabricación de la prótesis, en este capítulo sólo se expone la metodología para la obtención de un prototipo y demuestra la fabricación de la prótesis. No obstante, actualmente existe controversia sobre la implantación de piezas fabricadas mediante AM en pacientes porque el proceso productivo está en vías de validación y comprobaciones de estándares. Por un lado, lo que se pretende demostrar en este capítulo es la importancia que toma la fase de diseño por encima de la fabricación cuando se trata de tecnologías AM. Por otro lado, demostrar el avance de la bioingeniería, de forma que cuando sean aprobados los procesos de AM y cuando sea posible la utilización del producto para el uso directo a pacientes, se tenga una metodología de trabajo establecida.

6.2.1 Geometría 3D

InVesalius (CTI, 2012) es un software libre que permite transformar las distintas imágenes del CT en una imagen en 3D. Se realizaron 312 imágenes para abarcar toda la geometría de interés, con un tamaño de 640x640 píxeles, estas imágenes fueron adquiridas usando el software Xoracat® y se exportaron usando el protocolo DICOM (Digital Imaging Communications in Medicine) (Pianykh, 2012). El programa InVesalius permite dibujar o borrar en cada una de las capas para corregir los ruidos que aparecen durante la obtención de las imágenes y definir correctamente la geometría debido a una incorrecta calibración de los medios utilizados o bien por interacciones con el mismo paciente en el caso de tener elementos metálicos.

InVesalius trabaja con distintas estructuras (hueso cortical, hueso trabecular, músculo, sangre y grasa entre otros), cada estructura está definida según la escala de Hounsfield. El modelo genera las estructuras uniendo e interpolando las distintas imágenes con una estructura o escala de Hounsfield similar, dando así, el modelo final. Los huesos, dientes y músculos generados en el programa fueron guardados individualmente en el formato StL.

6.2.2 Ingeniería inversa

Una vez se generan los distintos archivos con los cuales se tenían las distintas estructuras, se usó el programa de modelación de superficies Rhinoceros® para definir solamente la geometría de la mandíbula sana, siguiendo el procedimiento BioCAD (Kemmu et al., 2012), donde se marcan las líneas anatómicas principales (líneas negras) que se pueden visualizar sobre el archivo StL (color marrón) y la superficie generada (color carne) de la Figura 6.1. En este caso se realizó el mismo procedimiento descrito en la mandíbula para la obtención de los dientes y de los músculos.

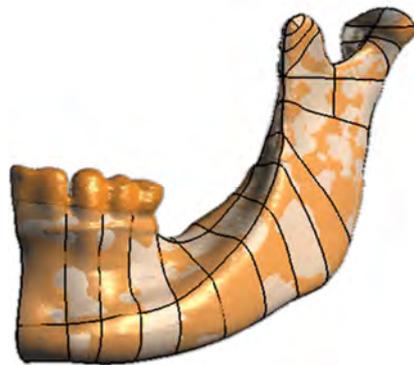


Figura 6.1: Líneas principales y secundarias para definir la mandíbula

Para tratar de tener una mejor aproximación a la estructura del hueso en el diseño final y también para tener una mejor simulación, la parte de la mandíbula se dividió en cortical y trabecular, estas dos estructuras no tienen un cambio radical, sino que el hueso va pasando de cortical a trabecular, en la simulación, se trabaja con un espesor de 2mm de cortical y las otras partes se definieron como trabecular. La raíz de los dientes tiene contacto con el hueso cortical, por este motivo, en la parte de los dientes se dio un sobreespesor de 1mm de hueso cortical.

Se realizó una simplificación de la raíz de los dientes debido a que la tomografía general no es suficientemente precisa, en este caso, para tener un diseño preciso de la geometría sería necesaria la utilización de la tomografía y la radiografía periapical. Como se puede observar en la Figura 6.2a, se utilizan las líneas para definir las líneas principales siguiendo la metodología BioCAD, el color marrón define el archivo StL obtenido mediante InVesalius y la parte de color carne indica la superficie dibujada en Rhinoceros®. Únicamente se puede realizar la ingeniería inversa de 5 de los 8 dientes (Figura 6.2b) porque los demás los perdió durante la vida, lo que hace que no se puedan reproducir.

Después de diseñar reproduciendo las 3 geometrías de la parte no atacada por el ameloblastoma se realizó una simetría por el plano sagital, obteniendo así, un modelo íntegro de la mandíbula con las dos estructuras, dientes y musculatura, estos elementos son los que involucran el trabajo de la reconstrucción de la mandíbula.

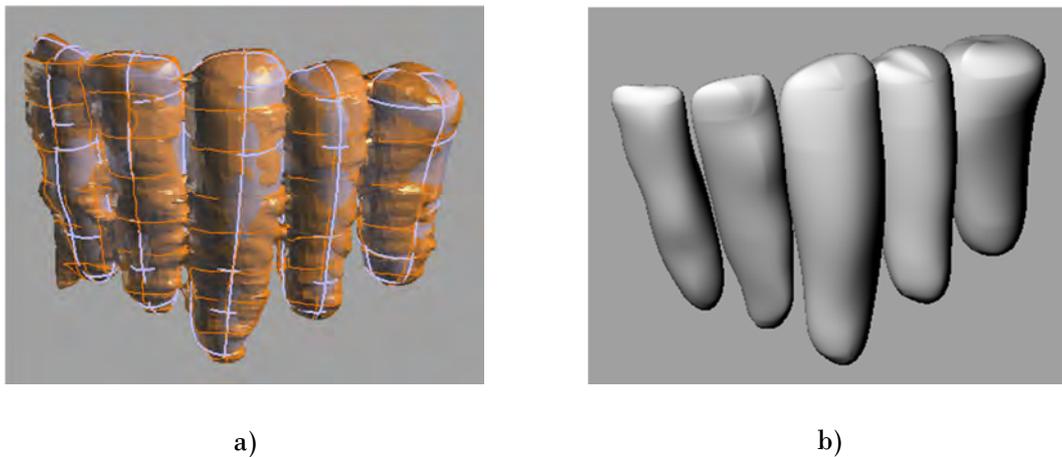


Figura 6.2: Simplificación de los dientes a) Superposición de líneas principales, StL y superficie b) diseño final

Antes de realizar el diseño de la prótesis se observó si el ameloblastoma había desplazado la mandíbula, para poder corregir y asegurar que el cóndilo encaje en la fosa.

6.2.3 Diseño Prótesis

Se considera realizar un diseño de la prótesis que siga las líneas anatómicas exteriores de la paciente para tratar de que el aspecto final del rostro sea parecido al del paciente antes del ameloblastoma. Para la realización de la prótesis se considera trabajar con dos tipos de materiales, para la estructura ósea, se trabaja con una aleación de titanio biocompatible (Ti6Al4V) ya que tiene una baja corrosión y unas propiedades mecánicas superiores a las del hueso, esto conlleva que la prótesis tendrá menos volumen que la mandíbula sana. Para el material de los dientes, se escogió una resina restauradora universal Filtek™ Z250 de 3M™ para dar un recubrimiento al material estructural, que es la misma aleación de titanio.

Una vez escogidos los materiales a utilizar, se realiza el diseño de la prótesis siguiendo las mismas líneas anatómicas exteriores, para que la paciente tenga el mismo aspecto antes del tumor (Figura 6.3) y adaptando la geometría para poder unir la prótesis con la mandíbula.

Del diseño de la prótesis se han realizado tres cambios significativos, el primero es la eliminación de la parte de la apófisis corónides, donde el nuevo diseño sigue el perfil de la escotadura mandibular hasta llegar a la línea oblicua, esta modificación se realiza porque la función principal de esta parte es realizar el movimiento de translación de la mandíbula con el músculo temporal y queda eliminado con la sustitución de la prótesis.

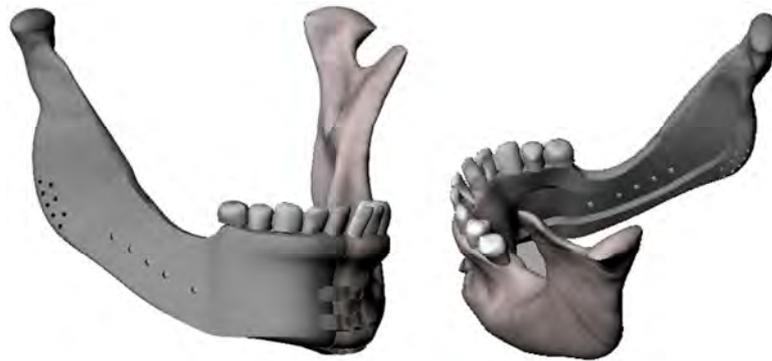


Figura 6.3: Diseño de la mandíbula con la prótesis fija

El segundo cambio es la geometría que se sigue en la parte interna, donde se deja de seguir las líneas anatómicas para realizar una disminución de la sección, disminuir la rigidez y tener una reducción del peso de la prótesis, esta reducción empieza en el agujero mandibular, cavidad donde entran los nervios y venas, y va resiguiendo el mismo camino hasta aproximadamente la fosa sublingual. La disminución de esta parte de la mandíbula se realiza porque mediante las primeras simulaciones se observa que la prótesis tiene un coeficiente de seguridad muy grande, además, en esta zona, como se ha comentado, es donde pasan los nervios y las venas, por lo que son lugares donde no recibe mucha tensión durante la mordedura. El tercer cambio significativo consiste en la realización de las distintas uniones con las partes del cuerpo, esto significa que se realizaron ocho agujeros en la parte de la unión del músculo masetero con la prótesis, cinco agujeros para poder agarrar el tejido blando, se diseñaron los implantes para colocar posteriormente los dientes y las placas para unir la prótesis con el hueso.

En el caso de los dientes, se realizó una prótesis fija de tres pilares y dos puentes para disminuir el número de pilares y tener una distribución de tensiones uniformes, además, de disminuir el número de aberturas que se deben realizar en el tejido, dando así, menos posibilidades a una infección. Los dientes fueron fabricados con la aleación de titanio y con un recubrimiento de la resina para dar una buena sensación con el contacto con los dientes sanos y con la lengua.

La unión de la prótesis con el hueso se realiza mediante seis tornillos de la misma aleación de titanio para no tener un cambio electrolítico del material y disminuir así el ataque debido al medio ácido que produce el cuerpo. Estos tornillos están separados por al menos 1 mm entre ellos y también con la raíz del diente para evitar posibles lesiones.

6.2.4 Simulación

Las simulaciones se realizaron usando el software de elementos finitos ANSYS® Workbench 12.1 y usando dos tipos de geometrías, en el primer caso, toda la mandíbula y los dientes sanos, para poder tener una información de referencia, y en el segundo caso, la mandíbula con la prótesis. El objetivo del análisis es determinar dos características básicas para poder evaluar el diseño: (1) el desplazamiento máximo y (2) la tensión de Von Mises. El primer análisis fue realizado asumiendo que la boca estaba cerrada y los dientes hacían contacto con los dientes superiores, que no hay ninguna interacción con otras partes del cuerpo y que los músculos ejercían una fuerza simétrica, en dirección e intensidad. En el caso de la mandíbula con la prótesis, se asumen las mismas condiciones exceptuando que el temporal no ejerce una fuerza en la prótesis, por lo tanto, no se tiene una fuerza simétrica en el caso particular de este músculo.

Con las restricciones mencionadas anteriormente fueron aplicadas las presiones que se obtuvieron en la literatura (Nickel et al., 2003), calculando las fuerzas de los músculos de la masticación, pterigoideo, temporal y masetero, durante la mordedura (Tabla 6.1). En el caso de la fuerza del músculo temporal sólo se realiza en la mandíbula porque el diseño final de la prótesis no tiene la parte del corónides.

Fuerza de los músculos	Pterigoideo	Temporal	Masetero
X	50	41	41
Y	0	-41	-32
Z	136	212	132

Tabla 6.1: Fuerzas y direcciones de las fuerzas de los músculos. Fuente: (Nickel, 2003)

Cada una de las distintas partes de la geometría se caracteriza según las propiedades mecánicas (Tabla 6.2) que se obtienen de las distintas referencias bibliográficas (Ko et al., 1992; Tanaka et al., 2003). Para la mandíbula se definió el módulo de Young y el coeficiente de Poisson en base a los datos obtenidos por Ko (Ko et al., 1992) y la resistencia mediante el trabajo de Tanaka (Tanaka et al., 2003). Las propiedades mecánicas de la prótesis fueron obtenidas a través de la base de datos de la compañía EOS (EOS) que comercializan el producto biocompatible de titanio y para el restaurador cerámico dental Z250 a través de 3M (3M).

Propiedades mecánicas	Módulo de Young [MPa]	Resistencia a tracción [MPa]	Coefficiente de Poisson
Cortical	1,37x10 ⁴	123	0,3
Trabecular	1,37x10 ³	123	0,3
Dentina	1,86x10 ⁴	103	0,31
Ti6Al4V	1,1x10 ⁵	1030	0,28
Z250	1,55x10 ⁴	82	0,35

Tabla 6.2: Propiedades mecánicas de los elementos de la mandíbula y la prótesis

Para realizar la simulación de la geometría se importa la geometría obtenida en el Rhinoceros® en formato step, para mallar la geometría en ANSYS® se utiliza un mallado con 285.000 elementos tetraédricos con 427.000 nodos. El mallado fue realizado manualmente para tener un control de la malla y realizar elementos más pequeños en aquellas zonas donde hay los elementos de principal interés, es decir, las interacciones de los dientes con la mandíbula, la mandíbula con los tornillos, las placas de la prótesis con los tornillos y los agujeros para fijar los músculos (Figura 6.4).

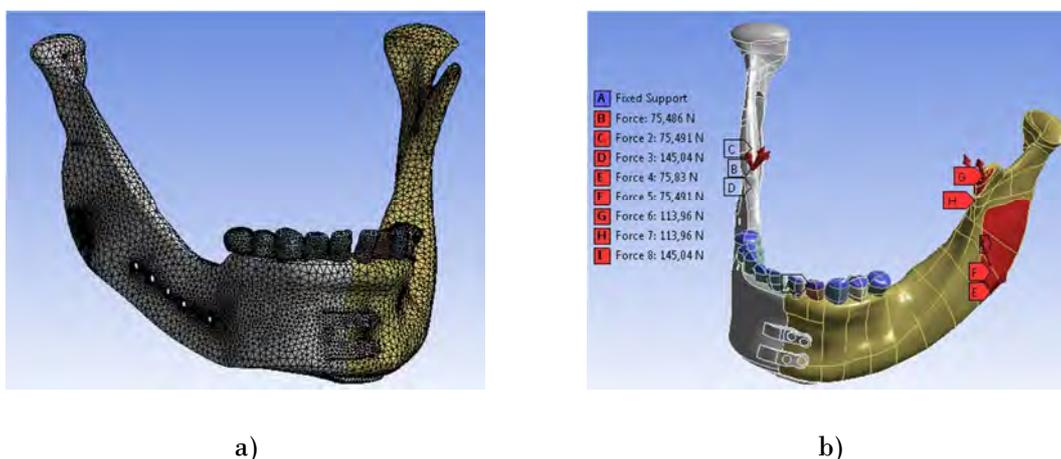


Figura 6.4: a) Mallado de la mandíbula y la prótesis y b) condición de frontera

Los resultados que se obtienen de la simulación aplicando las condiciones de frontera anteriormente descritas dan un desplazamiento de la mandíbula totalmente sana, es decir, del valor óptimo a encontrar de 1,66mm (Figura 6.5a), únicamente se realiza la mitad de la mandíbula porque se aplica una condición de simetría con la otra parte. Como se puede observar, en la Figura 6.5b se muestra la deformación de la mandíbula con la utilización de

la prótesis, en este caso el desplazamiento es de 1,59mm, por debajo del valor y cercano al valor obtenido mediante la mandíbula sana. El resultado nos permite asegurar que no existe un contacto entre el cóndilo y la fosa del cráneo. Asimismo, en la Figura 6.5c se muestra la deformación de toda la mandíbula, obteniendo que el máximo desplazamiento se encuentra en la parte de la mandíbula. El valor de desplazamiento obtenido de la prótesis es de 0,60mm por lo que también se evita un contacto con el cráneo.

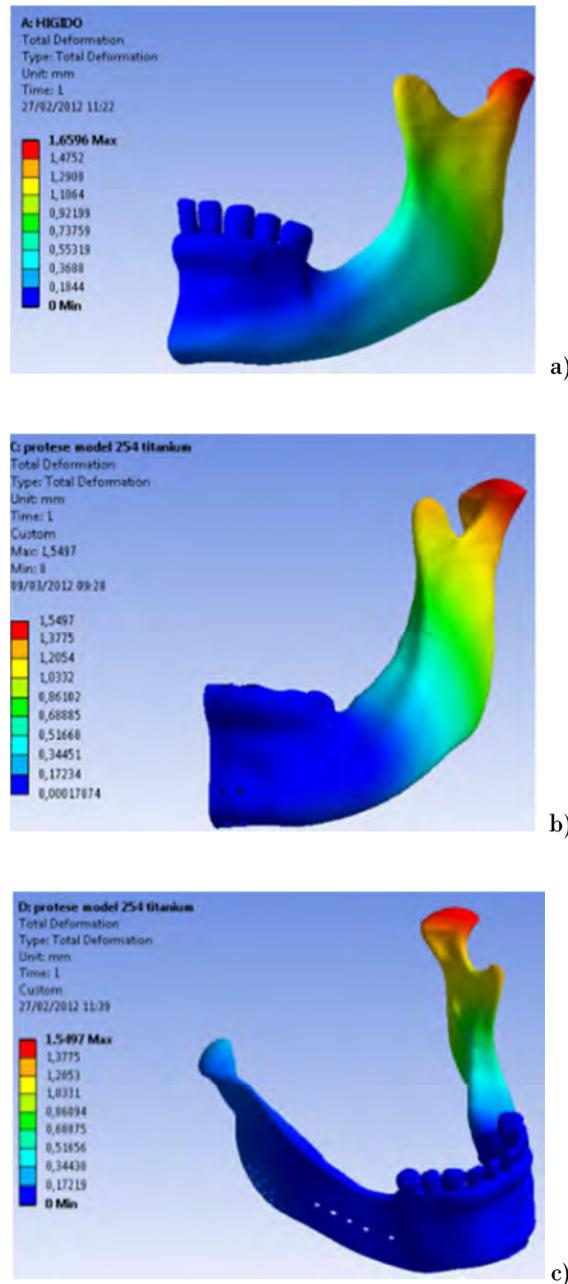


Figura 6.5: Desplazamiento a) mandíbula sana b) mandíbula operada c) conjunto completo

De la misma forma que se obtiene el desplazamiento se obtiene la tensión de Von-Mises. En el caso de la mandíbula se tiene el objetivo de una tensión de 148 MPa (Figura

6.6a). La tensión de Von Mises de la mandíbula con la inserción de la prótesis es de 103 MPa (Figura 6.6b), con lo que se puede asegurar que soporta los esfuerzos porque el valor es inferior a la de la mandíbula sana, aun así, es necesario observar si la prótesis puede soportar el esfuerzo (Figura 6.6c), en este caso, el valor es de 298 MPa indicando que la parte de la prótesis asume más tensión que la mandíbula pero que está muy lejos de su valor a rotura.

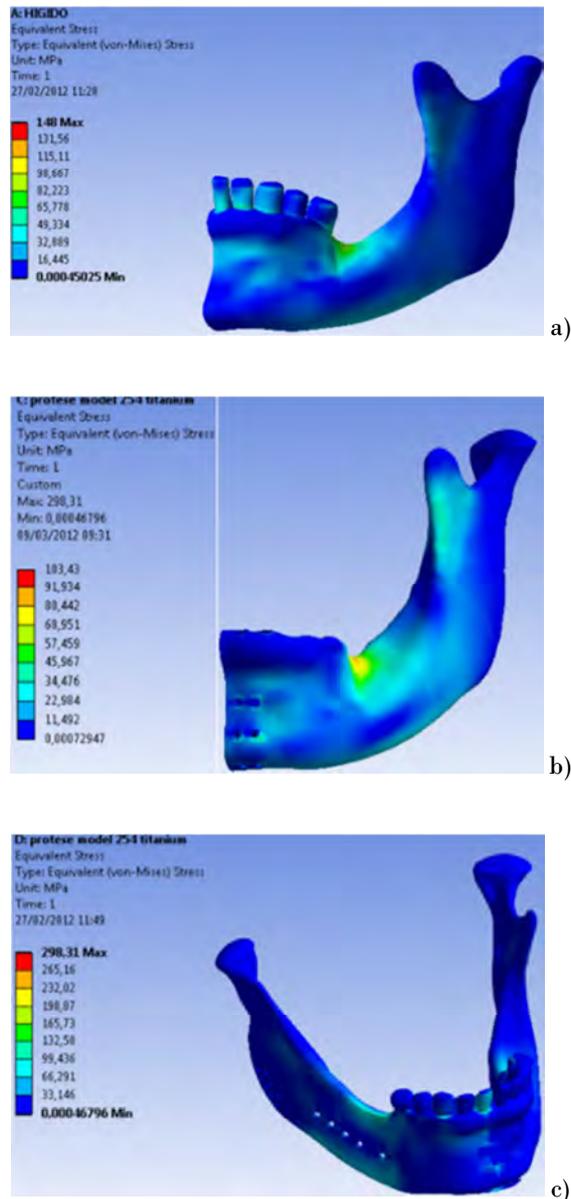


Figura 6.6: Esfuerzo Von Misses a) mandíbula sana b) mandíbula operada c) conjunto completo

6.2.5 Fabricación

La fabricación de la mandíbula se realiza mediante una máquina de adición de capas DMLS M270 de la compañía alemana EOS GmbH (EOS). La tecnología permite realizar

piezas sin tener una restricción geométrica como acontece en las otras tecnologías convencionales que existen en la actualidad y, al tratarse de una tecnología que realiza los modelos a partir de los diseños en 3D, se pueden realizar piezas únicas o personalizadas. La utilización de esta tecnología en la fabricación de la mandíbula es perfecta por la geometría, personalización y alto valor añadido.

El proceso de fabricación empieza con el archivo StL generado en el programa de diseño Rhinoceros®. El programa de la máquina utiliza el Magics RP® que corta automáticamente la geometría en capas de 20 micras. El proceso empieza con la distribución del Ti6Al4V en polvo en una capa de aproximadamente de 20 micras, una vez se ha distribuido el polvo, el láser de fibra de Nd:YAG de 200W va fundiendo el polvo según la geometría de la primera capa, obteniendo una pequeña piscina de material fundido, una vez radiado la primera capa, la máquina desciende la plataforma de construcción y vuelve a suministrar otra capa de polvo, el láser vuelve a radiar la superficie fundiendo el polvo por donde va pasando, uniéndose en la capa inferior y en la misma capa. El proceso se repite hasta terminar la geometría de toda la pieza, en este caso, se realizaron por separado la prótesis, los dientes y los tornillos (Figura 6.7).

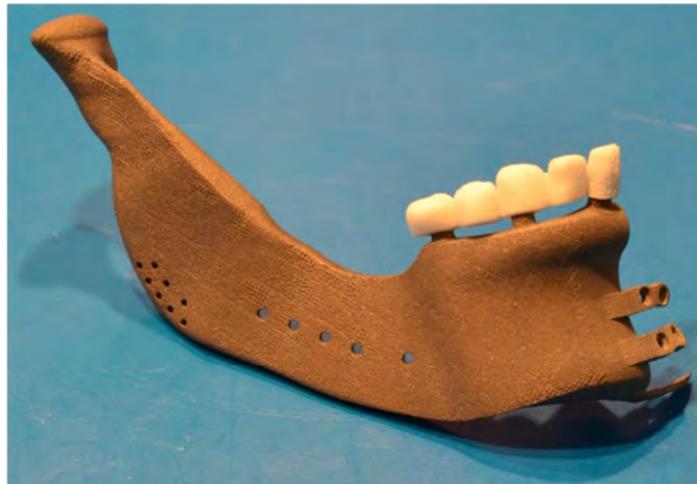


Figura 6.7: Prótesis final con los dientes

6.3 Resultados

El objetivo del trabajo es demostrar la viabilidad para obtener una prótesis de una mandíbula que es afectada por un ameloblastoma. Esta reconstrucción es fabricada a partir de una tecnología aditiva con un material biocompatible mediante una secuencia de procesos que empieza con la tomografía de la paciente hasta la fabricación de la prótesis. Se debe tener en cuenta que este trabajo se realizó gracias al intercambio de conocimientos entre los

doctores cirujanos e ingenieros dando así un valor al producto final. En este caso, los doctores dan el conocimiento más biológico del cuerpo, las facilidades y sobre todo las dificultades que se encuentran en las operaciones y procesos clínicos. Uno de los grandes problemas es obtener una placa que se adecue al paciente y que no se tengan que realizar distintas pruebas de ensayo y error, ya que esto perjudica la concentración del médico, el tiempo de operación y que la geometría no resulte óptima en el paciente, además, en algunos casos pueden existir manipulaciones excesivas de la placa dando problemas de fatiga ya que se están realizando deformaciones plásticas y consiguiendo entonces una pobre adaptación y funcionalidad. Por el otro lado, se encuentra el ingeniero, que tiene un conocimiento de los distintos materiales y sus propiedades mecánicas, los procesos de fabricación y también del desarrollo de diseño para dar una solución a los problemas que se encuentran actualmente en los quirófanos.

El resultado de este trabajo es una prótesis de una aleación de titanio biocompatible que su diseño parte de una tomografía o resonancia magnética, por este motivo, una de las mejoras conseguidas es la obtención de una prótesis personalizada, permitiendo un mejor funcionamiento, es decir, que encaje perfectamente a la mandíbula del paciente, tenga un diseño adecuado para soportar las cargas y además evite que el cirujano desempeñe el trabajo de rediseño.

El proceso de diseño se realiza mediante el proceso BioCAD que permite mediante las líneas principales obtener la geometría de la mandíbula de forma relativamente rápida. Una vez obtenida esta geometría, se debe hacer un diseño de la prótesis, en esta etapa, hay infinitas soluciones y dependen de la capacidad del diseñador para obtener una geometría que sea lo suficientemente resistente para soportar los esfuerzos y que no haga una desviación de los esfuerzos que recibe la mandíbula. Es aquí donde entra en juego la simulación e ir mejorando los diseños a partir de los resultados obtenidos.

La fabricación de la prótesis a través de la tecnología de AM es uno de los aspectos más importantes porque es el resultado final y sería el producto final a implantar al paciente, por este motivo, la tecnología debe ser robusta y tener un comportamiento del material muy bien conocido, para poder evitar la ruptura y el desgaste debido al medio ácido en que se debe encontrar.

6.4 Conclusiones

Los doctores actualmente no tienen las mejores herramientas para poder realizar la geometría de las prótesis en el pre-operatorio porque las tomografías y las radiografías no aportan suficiente información. Los cirujanos deben hacer, por lo tanto, los retoques en el

momento de la operación y evidentemente esto influye en el tiempo y el riesgo que el paciente está en el quirófano.

Por este motivo, la prótesis no es el resultado más importante de este capítulo, sino el protocolo a seguir para hacer frente a la reconstrucción de una parte del cuerpo, realizando a través de la información de la tomografía del paciente, dando lugar al diseño personalizado de la prótesis final, la cual, debido a la fabricación única tiene un alto valor añadido. El diseño personalizado, además, reduce la incertidumbre de los doctores porque la geometría de la prótesis se adapta al paciente.

Durante el proceso de diseño es necesario establecer la estrategia adecuada para poder obtener una solución válida. La metodología BioCAD es un proceso que permite obtener la geometría del paciente realizando la ingeniería inversa a través de las líneas principales y secundarias de la zona a diseñar del paciente, las cuales se obtienen de la tomografía, aunque, no existe una metodología para el diseño de la prótesis por lo que es necesario establecer también un protocolo de trabajo para satisfacer los requerimientos. No obstante, hay distintas estrategias para afrontar el problema del diseño de la prótesis y existen multitud de soluciones que satisfacen los requerimientos, sin embargo, el objetivo es obtener un diseño de una prótesis que tenga una solución válida y factible a los problemas que se encuentran diariamente los médicos cuando están en una sala de operaciones.

También debe existir un aprendizaje del ingeniero de todo el proceso para utilizar las distintas herramientas de diseño y simulación, no sólo para solucionar los problemas en que se encuentra, sino también para dar una mejor solución a los conflictos que pueden existir entre programas, dando así, una armonización de todo el proceso, porque todavía, en el día a día, no existen en el mundo soluciones comerciales que tengan en una misma aplicación, la integración de la adquisición de la tomografía, diseño, simulación y fabricación de prótesis de una manera fácil e integrada.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro

En el capítulo 7 se presenta las conclusiones de la tesis, además de resumir las principales contribuciones que se han derivado. Se presenta los trabajos futuros que se desprenden de la presente tesis.

7.1 Proyectos y conclusiones

La presente tesis ha sido fruto de parte de las actividades desarrollada en los proyectos:

Beca de investigación: Beca de investigación de la universitat de Girona BR09/04

*1 Trialpro 1: FIT-020400-2007-0313 Predicción del comportamiento final en servicio de piezas de serie, de metal o plástico, a partir de prototipos fabricados mediante técnicas de rapid manufacturing (70.124,00 €) BOE núm. 55 Martes 4 marzo 2008 – Ministerio de industria, turismo y comercio

*2 Trialpro 2: IAP-600300-2008-65 Proyecto de investigación aplicada para la predicción de comportamiento de piezas en serie final y desarrollo y recuperación de nuevos materiales de sinterizado para RM (85.674,00 €) BOE núm. 54 Miércoles 4 de marzo de 2009 – Ministerio de ciencia e innovación.

*3 UsInTec: SUP-040100-2007-23 Apoyo y asesoramiento tecnológico (175.200,00 €) 2007 Ministerio de industria, energía y turismo

*4 R²TAF: DPI2008-02667-ERed Tecnológica de Tecnologías Avanzadas de Fabricación () Ministerio de Educación y Ciencia

*5 IBE-RM: PSE-020000-2009-001 Rapid Manufacturing (241.000 €) Ministerio de Ciencia e Innovación

*6 IREBID: FP7-PEOPLE-2009-247476 Interantional Research Exchange for Biomedical Devices Design and Prototyping (322.344 €) Seventh Framework Programme of European Commission

Atualmente, uma das principais tendências na indústria de manufatura é a personalização dos produtos manufaturados. Uma das tecnologias que permitem a personalização e têm um alto valor agregado do produto final é através da adição de camadas, no entanto, é um processo descontínuo em que os parâmetros durante a fabricação têm influência (parâmetros do material, do laser e do processo). Além disso, as propriedades das peças feitas pela tecnologia têm comportamento de anisotropia, de modo que a direção da fabricação influencia nas propriedades finais da peça.

Nesta tese basicamente 4 conceitos contribuem para conhecer globalmente o processo de sinterização e fundição seletiva à laser.

- Definir uma metodologia para calcular a densidade de energia mínima para obtenção de um cordão, ademais analisar a influencia dos parâmetros envolvidos na formação

No primeiro caso, foi desenvolvido um método para calcular a densidade de energia mínima necessária para a formação de um cordão de CoCrMo donde são usados os movimentos cartesianos de uma máquina e é adaptado um laser para estudar o derretimento do pó de CoCrMo, sem a necessidade de conhecer as propriedades térmicas do material. O estudo foi realizado utilizando um design de experimentos em que com a variação dos parâmetros de potência, velocidade de varredura somados ao uso de um plano inclinado, para se ter uma modificação progressiva da altura da camada de pó, são criados diferentes tipos de cordão (contínuo, descontínuo, com efeito bola e sem sinterização) devido à energia subministrada em cada um dos experimentos, portanto, também se conhece a influencia dos parâmetros usados para os aspectos geometricos do cordão, densidade e dureza.

No entanto, é necessário realizar um estudo preliminar dos níveis e valores utilizados na metodologia para calcular a densidade de energia, pois em 26 dos 80 experimentos

(32,5%), a união não foi obtida no próprio cordão ou na camada inferior, devido ao baixo poder do laser ou da alta velocidade de varredura, o que poderia nos ter permitido estudar outras faixas de valores do processo e ter uma melhor compreensão da influência dos parâmetros. A metodologia é utilizada para calcular a densidade mínima necessária para se obter um cordão contínuo e no caso de se ter uma densidade abaixo desta aparecem irregularidades no cordão ou não se consegue a fixação na plataforma de construção. Dos três parâmetros usados, a altura da camada de pó tem uma maior influência sobre os aspectos geométricos analisados, enquanto a alimentação e a velocidade de varredura têm uma influência semelhante.

- Estudar o efeito dos parâmetros do processo no comportamento mecânico das peças por adição de camadas com geometria estandardizada.

No segundo caso, se fez uma avaliação dos efeitos dos parâmetros de processo utilizando uma geometria de ensaio normalizada. As amostras têm uma baixa complexidade geométrica e são realizadas para verificar como as alterações na velocidade de varredura e da altura da camada de pó afetam nas propriedades mecânicas, físicas e dimensionais da peça. O método de fabricação aditiva, mediante o sobreposição de camadas, acarreta que um dos parâmetros que afetam as propriedades mecânicas é o sentido de construção, devido ao mecanismo de ligação entre as camadas, portanto, pode-se dizer que, com tecnologias de SLS, DMLS e SLM obtêm-se um comportamento anisotrópico de material, isto é, as propriedades do material dependem da direção de fabricação. A tecnologia DMLS, usando um laser de CO₂ tem um erro dimensional na largura das peças fabricadas, devido ao sistema de laser usado. Usando parâmetros padronizados permite-se a obtenção de peças com um comportamento aceitável, apesar de que é possível melhorar só um comportamento específico em detrimento dos outros, alterando esses valores dos parâmetros do processo.

- Comparar o comportamento mecânico das peças fabricadas por processos tradicionais e por processos de SLM.

Por outro lado, além de estudar como afetam os parâmetros do processo, neste trabalho demonstra-se que ao contrário do que se acredita na sociedade, na qual as impressoras 3D são usadas apenas para prototipagem, a experimentação de peças normalizadas demonstra que as tecnologias aditivas têm um melhor desempenho do que as tradicionais. Esta tese vai mais longe, pois demonstra que as peças fabricadas por processos de adição de camadas, neste caso no estudo da SLM, em todos os casos, tem um melhor comportamento ao esforço e à deformação em relação às peças feitas pelo processo tradicional, demonstrando resultados de viabilidade do uso destas tecnologias para a aplicação cotidiana.

Finalmente, se fez um estudo do processo a ser seguido para obter-se uma prótese personalizada através da informação obtida pelo CT realizado no paciente, desta forma, têm-se um projeto que é perfeitamente adequado para a necessidade do paciente, porque é uma concepção personalizada e única, no entanto, durante o projeto é necessário utilizar

ferramentas de simulação para verificar o comportamento do modelo da prótese, a ligação entre a prótese e a parte saudável e, acima de tudo, o comportamento da parte saudável do paciente. Um dos problemas que existem hoje em dia é que não há um programa que permite fazer todos os conceitos do processo, desde o aspecto do tratamento da informação da tomografia até a fabricação, obviamente, passando por a concepção e simulação, sendo necessário fixar a orientação no projeto para ser capaz de criar ou simular os distintos softwares que pertencem ao processo.

7.2 Principales contribuciones

Las principales contribuciones que se derivan parcialmente o totalmente de esta tesis se detallan a continuación, a partir de los artículos, capítulos de libros y conferencias realizadas.

En revistas:

1. Delgado, J., Ciurana, J., Sereno, L., (2011) “Comparison of forming manufacturing processes and selective laser melting technology based on the mechanical properties of products. *Virtual and Physical Prototyping* Vol 6, No03, pp 167 - 178
2. Delgado, J., Ciurana, J., (2012) “Mechanical characterization study of metal material properties in additive layer processes” *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems* Vol 5, No 3/4, pp 189 - 213
3. Delgado, J., Ciurana, J., Rodríguez, C. A., (2012) “Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 60, No 5, pp 601 - 610
4. Ciurana J., Hernandez, L., Delgado, J., (2013) “Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*

En capítulos de libro:

5. Vallicrosa, G., Delgado, J., Sereno, L., Ciurana, J. (2011). “Continuous contour printing versus layer by layer printing in an additive manufacturing technology”, *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, CRC Press, Taylor and Francis, pp 491 – 494. ISBN: 978-0-415-68418-7
6. Delgado, J., Sereno, L., Hernández, L., Ciurana, J. (2011). “Methodology for analyzing the depth of sintering in the building platform”, *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, CRC Press, Taylor and Francis, pp 495 – 498. ISBN: 978-0-415-68418-7
7. Delgado, J., Sereno, L., Hernández, L., Ciurana, J. (2011). “Influence of process parameters in the first melting layer of a building platform in a SLM machine”, *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, CRC Press, Taylor and Francis, pp 499 – 502. ISBN: 978-0-415-68418-7
8. Delgado, J., Ciurana, J., Caballini, B., Reguant, C. (2009). “Studying the repeatability in DMLS technology using a complete geometry test part”, *Innovative Development in*

Design and Manufacturing, CRC Press, Taylor and Francis, pp 349 – 353. ISBN: 978-0-415-87307-9

En congresos:

9. Delgado, J., Laureti, C.A.R., Camilo, A.A., Silva, J.V.L., Sereno, L., Ciurana J. (2012) “Mandible reconstruction using an additive manufacturing technology” *Proceedings PROMED 2012 I International conference on design and processes for medical devices*, Vol 1 pp 275 – 278. ISBN: 978-88-6608-058-9
10. Delgado, J., Noritomi, P.Y., Da Silva, J.V.L., Ciurana, J., Serenó, L. (2012) “Proceso de reconstrucción de una mandíbula utilizando una prótesis fabricada con tecnología aditiva” *VII Congreso Nacional de Engenharia Mecânica* ISSN: 2178-180X
11. Lamikiz, A., Tabernero, I., Ukar, E., López De Lacalle, L.N., Delgado, J. (2010) “Influence of the laser cladding strategies on the mechanical properties of inconel 718” *AIP Conference Proceedings*, Vol 1315 pp 1576-1581
12. Tabernero, I., Lamikiz, A., Ukar, E., Artetxe, E., Delgado, J. (2010) “Evaluación de las propiedades mecánicas de recubrimientos realizados por plaquado láser en Inconel 718” *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*.

7.3 Trabajo futuro

Los trabajos futuros que arrancan de los resultados y contribuciones de la presente tesis se pueden resumir esquematizadamente en los 4 capítulos realizados:

Capítulo 3: Análisis morfológico SLM

- Utilizar los resultados obtenidos para la fabricación de múltiples cordones con distintos espacios de escaneo para evaluar la creación de una capa continua y constante. Analizar además cómo afecta cada una de las líneas en la superposición de cordones.
- Comprobar cómo afecta la dirección del haz en la fundición selectiva por láser, de este modo, observar si la dirección de la altura de capa modifica las propiedades geométricas y de continuidad del cordón.
- Estudiar si la metodología de trabajo es útil para estudiar cualquier otro tipo de material, modificando los valores de los parámetros si fuese necesario. Además, se puede realizar el mismo experimento con CoCrMo modificando la plataforma de construcción, de este modo, se modificaría la interacción entre el polvo fundido y la base sólida, modificando la mojabilidad o ángulo de contacto.
- Realizar la misma experimentación teniendo un control de la atmosfera y pudiendo disminuir la cantidad de oxígeno en la cámara, de este modo, evitar la oxidación, y por lo tanto, energía, para poder formar esta oxidación.

- Diseñar una plataforma de construcción, esta plataforma debe tener los sensores para poder calcular el porcentaje de oxígeno, humedad del ambiente para poder saber cómo afectan las condiciones en la formación del cordón. Además, la plataforma debe poder permitir calentar la temperatura tanto de la plataforma de construcción como la plataforma de aportación de material para poder disminuir el choque térmico, además de influir en la energía suministrada por el láser debido a que el incremento de temperatura es menor, además de tener una mejor absorción de la energía suministrada y mejorar las propiedades de mojabilidad. Una vez realizado la superposición de cordones, es necesario la realización de las superposiciones de capas.
- Realizar una simulación para comprender el fenómeno de la fundición selectiva por láser, inicialmente utilizar los parámetros de entrada y de la temperatura para poder realizar una aproximación del fenómeno. Una vez se tenga la simulación, poder predecir las propiedades finales del producto sin la necesidad de realizar una experimentación.

Capítulo 4: Caracterización mecánica del producto

- Realizar la misma fabricación de probetas para estudiar la repetibilidad de todas las propiedades dimensionales, físicas y mecánicas analizadas durante la tesis y estudiar la variabilidad de los tres procesos de adición.
- Realizar ensayos de fatiga, impacto e incluso de oxidación de los materiales para conocer cómo afectan los parámetros en estas nuevas características, además, se puede realizar la introducción de la temperatura para observar el comportamiento de estos nuevos ensayos y también de los ya realizados.

Capítulo 5: Proceso tradicional vs proceso SLM

- Realizar ensayos de fatiga, impacto y de oxidación de piezas fabricadas mediante el proceso tradicional y el proceso SLM, de esta forma, estudiar las diferencias que existen entre los dos métodos de fabricación en las propiedades mecánicas, físicas y químicas, de esta forma, aumentar el conocimiento del proceso SLM.
- Fabricar las mismas piezas utilizando distintas máquinas de SLM para estudiar el comportamiento de estas máquinas de fundición y comparar los resultados con los obtenidos en esta tesis.
- Realizar simulaciones por elementos finitos de las 4 piezas fabricadas por SLM y compararlas con los resultados obtenidos de este trabajo.

Capítulo 6: El diseño en tecnologías AM

- Realizar los ensayos en la mandíbula para comprobar que los parámetros introducidos en la simulación tienen un comportamiento similar a la realidad, además de realizar un estudio de biocompatibilidad de la pieza obtenida.
- Mejorar el diseño de la mandíbula modificando todos los bordes abruptos por curvas suavizadas, de esta forma, disminuir el riesgo de lesión por fricción y corte, de forma que sea un diseño más ergonómico.
- Estudiar cuales son las posibles mejoras o rediseños que se pueden realizar en la mandíbula para adaptarlo también a la forma de trabajar de cada uno de los cirujanos.

Capítulo 8. Referencias

Artículos:

3D Systems. Disponible en: <http://www.3dsystems.com>. Accessed 04/11, 2011

Agarwala M, Bourell D, Beaman J, Marcus H, Barlow J. (1995) “Direct selective laser sintering of metals” *Rapid Prototyping Journal* Vol 1, No.1, pp. 26-36

Arcella F, Park B, Lessmann G, Hills P (1988) “Casting Shapes” *Patent US 4.818.562*

ASTM F2792-12a Standard terminology for additive manufacturing technologies.
<http://www.astm.org/Standards/F2792.htm> Accessed 06/11/2013

Averyanova M, Cicala E, Bertrand Ph, Grevey D, (2012) “Experimental design approach to optimize selective laser melting of martensitic 17-4 PH powder: part I – single laser tracks and first layer” *Rapid Prototyping Journal* Vol. 18, No 1, pp 28 – 37

Beal VE, Erasenthiran P, Hopkinson N, Dickens P, Ahrens CH. (2006) “The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 30, No 9-10, pp 844-852

Beaman JJ, Deckard CR, inventors (1989) “Selective laser sintering with assisted powder handling” *US patent 4,938,816*

Chawla N, Deng X. (2005) “Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels” *Materials Science and Engineering A* Vol 390, No 1-2, pp 98-112

Childs THC, Hauser C, Badrossamay M. (2004) “Mapping and modelling single scan track formation in direct metal selective laser melting” *CIRP Annals Manufacturing Technology* Vol 53, No 1, pp 191-194

Chua CK, Chou SM, Wong TS. (1998) “A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 14, No 2, pp 146-152

Ciraud, P. inventor (1973) "Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebigem schmelzbarem Material" *German patent application DE 2263777*

Ciurana Q., Fernández A., Monzón M., (2008) “Guía de tecnologías de rapid manufacturing” *Documenta Universitaria* ISBN: 978-84-96742-18-5

Ciurana J., Hernandez L., Delgado J., (2012) “Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Submitted September 2012 – First revision submitted February 2013)

Concept-Laser. Disponible en: <http://www.concept-laser.de/> Accessed 09/01, 2008.

CTI (2012) InVesalius. Centro de Tecnologia de la Informaçao Renato Archer, Campinas, Brasil. Disponible para descarga en www.softwarepublico.gov.br acceso el 24/02/2012

Dadbakhsh, S., Hao, L., Sewell, N. (2012) “Effect of selective laser melting layout on the quality of stainless steel parts” *Rapid Prototyping Journal* Vol 18, pp 241–249

Das S, Wohler M, Beaman JJ, Bourell DL. (1999) “Processing of titanium net shapes by SLS/HIP” *Materials and Design* Vol 20, No 2-3, pp 115-121

Das S. (2003) “Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals” *Advanced Engineering Materials* Vol 5, No 10, pp 701-711

Deckard C, inventor (1989) “Method and apparatus for producing parts by selective sintering” *US patent 5,017,753*

Delgado, J., Ciurana, J., Caballini, B., Reguant, C. (2009). “Studying the repeatability in DMLS technology using a complete geometry test part” *Innovative Development in Design and Manufacturing, CRC Press, Taylor and Francis*, pp 349 – 353. ISBN: 978-0-415-87307-9

Delgado, J., Ciurana, J., Sereno, L., (2011) “Comparison of forming manufacturing processes and selective laser melting technology based on the mechanical properties of products” *Virtual and Physical Prototyping* Vol 6, No 3, pp 167-178

Delgado, J., Sereno, L., Hernández, L., Ciurana, J. (2012a) “Methodology for analyzing the depth of sintering in the building platform” *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, CRC Press, Taylor and Francis*, pp 495 – 498. ISBN: 978-0-415-68418-7

Delgado, J., Sereno, L., Ciurana, J., Hernandez, L. (2012b) “Influence of process parameters in the first melting layer of a building platform in a SLM machine” *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, CRC Press, Taylor and Francis*, pp 499 – 502. ISBN: 978-0-415-68418-7

Delgado J, Ciurana J, Rodríguez CA. (2012c) “Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 60, No 5-8, pp 601-610

Delgado, J., Ciurana, J., (2012) “Mechanical characterization study of metal material properties in additive layer processes” *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems* Vol 5, No 3/4, pp 189-213

Dolenc A, Mäkelä I. (1994) “Slicing procedures for layered manufacturing techniques” *Computer-Aided Design* Vol 26, No 2, pp 119-126

Economist. Disponible en: <http://www.economist.com/node/21552892>. Accessed 04/21, 2012.

Einstein A. (1917) “On the quantum theory of radiation” *Physika Zeitschrift* Vol 18, pp.121-128

EOS. Disponible en: <http://www.eos.info/>. Accessed 09/01, 2008

Feygin M, inventor. (1988) “Apparatus and method for forming an integral object from laminations” *US patent 4,752,352*

Fischer P, Romano V, Weber HP, Karapatis NP, Boillat E, Glardon R. (2003) “Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source” *Acta Materialia* Vol 51, No 6, pp 1651-1662

Fischer P, Blatter A, Romano V, Weber HP. (2005) “Selective laser sintering of amorphous metal powder” *Applied Physics A: Materials Science and Processing* Vol 80, No 3, pp 489-492

Ghany KA, Moustafa SF. (2006) “Comparison between the products of four RPM systems for metals” *Rapid Prototyping Journal* Vol 12, No 2, pp 86-94

Gibson I, Shi D. (1997) “Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process” *Rapid Prototyping Journal* Vol 3, No 4, pp 129-136

Gould, R. (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". *The Ann Arbor Conference on Optical Pumping* p. 128

Graf D, Lindemann M. (2001) “Process and apparatus for producing a shaped body by selective laser sintering” *UE patent 1234625*

Hanumaiah N, Ravi B. (2007) “Rapid tooling form accuracy estimation using region elimination adaptive search based sampling technique” *Rapid Prototyping Journal* Vol 13, No 3, pp 182-190

Hirata Y, Hara A, Aksay IA. (2009) “Thermodynamics of densification of powder compact” *Ceramics International* Vol 35 No 7, pp 2667-2674

Hope RL, Roth RN, Jacobs PA. (1997) “Adaptive slicing with sloping layer surfaces” *Rapid Prototyping Journal* Vol 3, No 3, pp 89-98

Housholder R, inventor (1979) “Molding process” *US Patent 4,247,508*

Hull C, inventor (1984) “Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography” *US patent 4,575,330*

ISO 4287 (1997) Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial.

ISO 6892-1 (2009) Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature

ISO 7438 (2005) Metallic materials - Bend test

ISO 11145 (2008) Óptica y fotónica. Láseres y equipos relacionados con láser. Vocabulario y símbolos.

Kemmoku, D.T.; Laureti, C.A.R.; Noritomi, P.Y.; Silva, J.V.L, (2012) “BioCAD techniques: Example on maxilla for rapid expansion simulation” *Innovative Developments in*

Virtual and Physical Prototyping - Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping pp. 715-718

Khaing MW, Fuh JYH, Lu L. (2001) "Direct metal laser sintering for rapid tooling: Processing and characterisation of EOS parts" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 113, No 1-3, pp 269-272.

Kim, G.D.; and Oh, Y.T., (2008) "A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost" *Journal of Engineering Manufacture* Vol 222, No 2, pp 201-215

Klocke F, Celiker T, Song Y (1995) "Rapid metal tooling" *Rapid Prototyping Journal* Vol 1, No 3, pp 32-42.

Ko CC, Chu CS, Chung KH, Lee MC., (1992) "Effects of posts on dentin stress distribution in pulpless teeth" *The Journal of Prosthetic Dentistry* Vol 68, No 3, pp 421-427

Kramer I., Pindborg J., Shear M., (1992) "Histological typing of odontogenic tumors" Springer. ISBN 978-3-540-54142-4

Kruth JP, Froyen L, Van Vaerenbergh J, Mercelis P, Rombouts M, Lauwers B. (2004) "Selective laser melting of iron-based powder" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 149, No 1-3, pp 616-622

Kruth JP, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, Froyen L, Rombouts M. (2005) "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting" *Rapid Prototyping Journal* Vol 11, No 1, pp 26-36

Kulkarni P, Dutta D. (1996) "An accurate slicing procedure for layered manufacturing" *Computer Aided Design* Vol 28, No 9, pp 683-697

Kumar S. (2009) "Sliding wear behavior of dedicated iron-based SLS materials" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 43, No 3-4, pp 337-347

Kumar S, Pityana S. (2011) "Laser-based additive manufacturing of metals" *Advanced Materials Research* Vol 227, pp 92-95

Li R, Liu J, Shi Y, Du M, Xie Z. (2009) "316L Stainless Steel with Gradient Porosity Fabricated by Selective Laser Melting" *Journal of Materials Engineering and Performance* Vol 19, No 5, pp 666-671

Li R, Liu J, Shi Y, Wang L, Jiang W. (2012) "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 59, No 9-12, pp 1025-1035

Liao Y, Chiu Y. (2001) "A new slicing procedure for rapid prototyping systems" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 18, No 8, pp 579-585.

Lohner A, Mattes T, Wilkening C (1995) "Apparatus and method to produce a three-dimensional object" *UE patent 0738584*

Loughborough University. Disponible en: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/>. Accessed 04/11, 2011.

Lu L, Fuh JYH, Wong YS (2001) “Laser-induced materials and processes for rapid prototyping”. Kluwer Academic Publishers ISBN: 0-7923-7400-2

Luo RC (1999) “Efficient 3D CAD model slicing for Rapid Prototyping manufacturing systems” *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* Vol 3, pp. 1504-1509

Ma W, He P. (1999) “Adaptive slicing and selective hatching strategy for layered manufacturing” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 89-90, pp 191-197

Maiman TH. (1960) “Stimulated optical radiation in Ruby” *Nature* Vol 187, No 4736, pp 493-494

Meena VK, Nagahanumaiah (2006) “Optimization of EDM machining parameters using DMLS electrode” *Rapid Prototyping Journal* Vol 12, No 4, pp 222-228

Meier H, Haberland C. (2008) “Experimental studies on selective laser melting of metallic parts” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Vol 39, No 9, pp 665-670

Mercelis P, Kruth J. (2006) “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting” *Rapid Prototyping Journal* Vol 12, No 5, pp 254-265

Metcalf JEP, Cawley J, Band TJ. (2004) “Cobalt Chromium Molybdenum Metal-on-Metal Resurfacing Orthopaedic Hip Devices” *Medical Device Manufacturing & Technology*

Morgan RH, Papworth AJ, Sutcliffe C, Fox P, O'Neill W (2002) “High density net shape components by direct laser re-melting of single-phase powders” *Journal of Materials Science* Vol 37, No 15, pp 3093-3100

Munguía, J., Ciurana, J., Riba, C. (2009) “Neural-network-based model for build-time estimation in selective laser sintering” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol 223, No 8, pp. 995-1003

Nickel J.C., Iwasaki L.R., Walker R.D., McLachlan K.R., McCall W.D. (2003) “Human masticatory muscle forces during static biting” *Journal of Dental Research* Vol 82, No 3, pp 212-217

Noguchi, H., Nakagawa, T. (1999) “Manufacturing of high precision forming tool transferred from laser stereolithography models by powder casting method”. *Computers in Industry* Vol 39, No 1, pp 55-60

Ning Y, Wong YS, Fuh JYH. (2005) “Effect and control of hatch length on material properties in the direct metal laser sintering process” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol 219, No 1, pp 15-25

Niu HJ, Chang ITH. (2000) “Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder” *Journal of Materials Science* Vol 35, No 1, pp 31-38

Noguchi H, Nakagawa T. (1999) "Manufacturing of high precision forming tool transferred from laser stereolithography models by powder casting method" *Computers in Industry* Vol 39, No 1, pp 55-60

Panjan P, Dolinsek S, Dolincek M, Cekada M, Skarabot M. (2005) "Improvement of laser sintered tools with PVD coatings" *Surface and Coatings Technology* Vol 200(1-4 SPEC. ISS.), pp 712-716

Paul BK, Baskaran S. (1996) "Issues in fabricating manufacturing tooling using powder-based additive freeform fabrication" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 61, No 1-2, pp 168-172

Perry R, Green D (1997) "Perry's Chemical Engineers Handbook." McGRAW-HILL ISBN: 0-07-049841-5

Pham, D.T., Dimov, S.S., Ji, C., Petkov, P.V., Dobrev, T. (2004) "Laser milling as a 'rapid' micromanufacturing process" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol 218, No 1, pp 1-7

Phenix Systems. Disponible en at: <http://www.phenix-systems.com/>. Accessed 04/11, 2011

Philip M., Morris C.G., Werning J.W., Mendenhall W.M. (2005) "Radiotherapy in the treatment of Ameloblastoma and Ameloblastic Carcinoma" *Journal of the Hong Kong College of Radiologists* Vol 8, pp 157-161

Pianykh O.S., (2012) "Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)" Springer ISBN: 978-3-540-74570-9

Piloto, P.A.G., Ribeiro, J.E., Campos, J.C. Reis, Correia, A., Vaz, M.A.P. (2008) "Simulação numérica do comportamento de uma mandíbula humana durante actividade mastigatória" *In 7º Congresso Nacional de Mecânica Experimental* pp. 231-233

Porter D, Easterling K, Sherif M., (2009) "Phase Transformations in Metals and Alloys" Taylor & Francis ISBN: 978-1420062106

Reichart P.A.; Philipsen H.P.; Sonner S., (1995) "Ameloblastoma: Biological Profile of 3677 Cases". *European Journal of Cancer Part B: Oral Oncology* Vol 31, No 2, pp. 86-99

Rochus P, Plessier J-, Van Elsen M, Kruth J-, Carrus R, Dormal T. (2007) "New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing (RP/RM) technologies for space instrumentation" *Acta Astronautica* Vol 61, No 1-6, pp. 352-359

Rombouts M. (2006) "Selective laser sintering/melting of iron-based powders" Katholieke Universiteit Leuven. Tesis U.D.C. 621.762

Rosochowski A, Matuszak A. (2000) "Rapid tooling: the state of the art" *Journal of Materials Processing Technology* Vol 106, No 1-3, pp. 191-198

Sachs, E., Cima, M., Cornie, J. (1990) “Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Vol 39, No 1, pp. 201-204

Sannomiya E.K., Silva J.V., Brito A.A., Saez D.M., Angelieri F., Dalben G.S., (2008) “Surgical planning for resection of an ameloblastoma and reconstruction of the mandible using a selective laser sintering 3D biomodel” *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontology* Vol 106, No 1, pp. e36-40

Santos EC, Shiomi M, Osakada K, Laoui T. (2006) “Rapid manufacturing of metal components by laser forming” *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol 46, No 12-13, pp. 1459-1468

Shellabear M, Nyrhila O. (2004) “DMLS - Development history and state of the art” Proceedings of the 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering, LANE

Shiomi M, Yoshidome A, Abe F, Osakada K. (1999) “Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders” I *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol 39, No 2, pp. 237-252

Simchi A, Pohl H. (2003) “Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder”. *Materials Science and Engineering A* Vol 359, No 1-2 pp. 119-128.

Simchi A. (2004) “The role of particle size on the laser sintering of iron powder” *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science* Vol 35, No 5, pp.937-948.

Simchi A. (2006) “Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features” *Materials Science and Engineering A* Vol. 428, No 1-2 pp.148-158.

Tanaka M, Naito T, Yokota M, Kohno M., (2003) “Finite element analysis of the possible mechanism of cervical lesion formation by occlusal force” *Journal of Oral Rehabilitation* Vol 30, No 1, pp. 60-7

Tang HH, Liu FH, Lin WH. (2006) “Rapid prototyping machine based on ceramic laser fusion” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 30, No 7-8, pp. 687-692

Tang Y, Loh HT, Wong YS, Fuh JYH, Lu L, Wang X. (2003) “Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 140, No (1-3 SPEC.), pp. 368-372

Tay FEH, Haider EA. (2002) “Laser sintered rapid tools with improved surface finish and strength using plating technology” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 121, No 2-3, pp.318-322

Thöne M, Leuders S, Riemer A, Tröster T, Richard HA. (2012) “Influence of Heat Treatment on Selective Laser Melting Products – e.g. Ti6Al4V” *Proceeding of Solid Freeform Fabrication Symposium* pp 492-498

Tolochko NK, Laoui T, Khlopkov Y, Mozzharov S, Victor I, Michail B. Ignatiev M. (2000) “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering” *Rapid Prototyping Journal* Vol 6, No 3 pp. 155-160

Tolochko NK, Arshinov MK, Gusarov AV, Titov VI, Laoui T, Froyen L. (2003) “Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder” *Rapid Prototyping Journal* Vol 9, No 5 pp. 314-326

Torres D.; Infante P.; Hernández J.; Gutiérrez JL., (2005) “Mandibular ameloblastoma. A review of the literature and presentation of six cases” *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal* Vol 10, pp. 231-238

Trumpf. Disponible en: <http://www.es.trumpf.com/>. Accessed 09/01, 2010

UNE 11146-1, 2006, Láseres y equipos relacionados. Métodos de ensayo para anchuras del haz láser, ángulos de divergencia y factor de propagación del haz. Parte 1: Haces estigmáticos y astigmáticos simples. <http://www.ca.aenor.es>

UNE 116005, 2012, Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas. <http://www.ca.aenor.es>

Van Der Schueren B, Kruth JP. (1995) “Powder deposition in selective metal powder sintering”. *Rapid Prototyping Journal* Vol 1, No 3, pp. 23-31

Van Elsen M, Al-Bender F, Kruth J. (2008) “Application of dimensional analysis to selective laser melting” *Rapid Prototyping Journal* Vol 14, No 1, pp.15-22

Vandenbroucke B, Kruth J. (2007) “Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts” *Rapid Prototyping Journal* Vol 13, No 4, pp. 196-203

Wang XC, Laoui T, Bonse J, Kruth JP, Lauwers B, Froyen L. (2002) “Direct selective laser sintering of hard metal powders: Experimental study and simulation” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 19, No 5, pp. 351-357

Wang Y, Bergstrom J, Burman C. (2006) “Characterization of an iron-based laser sintered material” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 172, No 1, pp. 77-87

Wang D, Yang Y, Su X, Chen Y. (2012) “Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 58, No 9-12, pp. 1189-1199

Wholers report (2009) “State of the industry. Annual worldwide progress report” Wohlers Associates. ISBN 0-9754429-5-3

Wholers report (2011) “Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry” Wohlers Associates. ISBN 0-9754429-7-X

Williams JD, Deckard CR. (1998) “Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process” *Rapid Prototyping Journal* Vol 4, No 2, pp. 90-100

Wong M, Tsopanos S, Sutcliffe CJ, Owen I. (2007) “Selective laser melting of heat transfer devices” *Rapid Prototyping Journal* Vol 13, No 5, pp. 291-297

Xie JW, Fox P, O'Neill W, Sutcliffe CJ. (2005) “Effect of direct laser re-melting processing parameters and scanning strategies on the densification of tool steels” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 170, No 3, pp. 516-523

Yadroitsev I, Smurov I. (2010) “Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape” 6th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering, LANE

Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, Smurov I. (2010) “Single track formation in selective laser melting of metal powders” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 210, pp. 1624-1631

Yadroitsev I, Yadroitsava I, Bertrand P, Smurov I. (2012) “Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks” *Rapid Prototyping Journal* Vol 8, No 3, pp. 201-208

Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I, Johansson S, Smurov I. (2013) “Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder” *Journal of Materials Processing Technology* Vol 213, No 4, pp. 606-613

Yang J, Ouyang H, Wang Y. (2010) “Direct metal laser fabrication: Machine development and experimental work” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 46, No 9-12, pp. 1133-1143

Zhang W, Shi Y, Liu B, Xu L, Jiang W. (2009) “Consecutive sub-sector scan mode with adjustable scan lengths for selective laser melting technology”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 41, No 7-8, pp. 706-713

Zhang, B., Liao, H., Coddet, C. (2012) “Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg-9%Al powder mixture”. *Materials & Design* Vol 34, pp. 753-758

Zhang LC, Klemm D, Eckert J, Hao YL, Sercombe TB. (2011) “Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy” *Scripta Materialia* Vol 65, No 1, pp. 21-24

Zhou MY. (2004) “Adaptive slicing of functionally graded material objects for rapid prototyping” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol 24, No 5-6, pp. 345-352