

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Máster en Ciencia e Ingeniería Avanzada de Materiales

ESTUDIO DE ADAPTACIÓN DE SISTEMA DE IMPRESIÓN CON PELLETS PARA RECUPERACIÓN DE RESIDUOS DE ALTO VALOR



Memoria y Anexos

Autor: Miguel Grande Molina

Director: José María Cabrera Marrero

Codirector: Roger Uceda Molera

Convocatoria: junio 2022

RESUM

En aquest treball s'ha estudiat la viabilitat d'imprimir peces metàl·liques i/o ceràmiques mitjançant impressió 3D utilitzant la tècnica MEAM-HP (*Material Extrusion Additive Manufacturing of Highly-Filled Polymers*) fent servir grànuls de PLA carregats amb diferents tipus de càrrega inorgànica reciclada subministrats per l'empresa Colfeed (grànuls de PLA + 20 % en volum de grafit, PLA + 47 % en volum de Ti6Al4V i PLA + 48 % en volum de WC-5%Ni). A la MEAM-HP, un termoplàstic (aglutinant) altament carregat de partícules inorgàniques s'introdueix en un capçal extrusor mòbil on es fon alhora que és empès a través d'un dau. El moviment del capçal respecte del llit d'impressió permet dipositar el material extruït capa a capa per construir un objecte tridimensional (peça en verd). La peça en verd se sotmet llavors a un cicle tèrmic a elevada temperatura on s'elimina el component polimèric i es promou que les partícules inorgàniques es fusionin entre elles, produint-se la densificació de la peça. Per a la impressió de les peces s'ha emprat un capçal extrusor de vis sens fi subministrat per l'empresa Tumaker al qual se li han realitzat diverses modificacions (per exemple, redisseny de la tremuja) perquè pugui emprar els grànuls com a matèria primera. Les propietats característiques dels grànuls (com, per exemple, fluïdesa, geometria, distribució de la mida de partícula o angle de repòs) s'han estudiat per poder dissenyar la tremuja. Per a l'estudi de la fluïdesa dels grànuls s'ha dissenyat i imprès en 3D un embut de Carney, obtenint uns resultats de fluència similars als obtinguts a l'emprar un embut de Carney comercial, i per tant, demostrant la viabilitat d'estudiar la fluïdesa dels grànuls fent servir l'embut imprès en 3D. Els resultats de fluència obtinguts a l'assaig de Carney coincideixen amb el tipus de flux observat en fer passar els grànuls per la tremuja. Els grànuls amb una mida de partícula màxima aproximada de 2,5 mm i distribucions de la mida de partícula ampla i bimodal són els que han presentat una millor fluència, mentre que els grànuls amb una mida de partícula màxima inferior a 0,8 mm i distribucions estretes són els que han presentant una pitjor fluència pel fet que es redueix la seva densitat aparent i s'incrementa l'efecte de les forces electrostàtiques i l'adsorció de la humitat augmentant la cohesió dels grànuls i la probabilitat d'atoraments a la tremuja.

A l'intentar extrudir els grànuls s'ha pogut observar que, independentment de la temperatura i del shear rate emprats, el flux de material extruït és irregular, cosa que ha impedit el correcte estudi dels paràmetres d'impressió. El flux irregular seria degut a una insuficient alimentació de material al vis sens fi causada per la generació de forats de rata al voltant d'aquest. Els grànuls de PLA + 48 % en volum de WC-5%Ni són els que han presentat un flux de material extruït més

regular a causa de la seva major mida de partícula, cosa que facilita a la tremuja i al vis sens fi el transport dels grànuls. Tot i el flux irregular de material, s'ha pogut determinar que els grànuls són imprimibles en un rang de temperatures d'entre 150 i 210 °C, sent el rang de 180 a 200 °C el que ha donat els millors resultats. A més també ha estat possible imprimir mostres prismàtiques quadrangulars de PLA + 48 % en volum de WC-5%Ni amb unes dimensions dels costats relativament similars entre elles (desviació estàndard d'entre 0,9 i 1,3 mm) però sense poder assolir l'alçada desitjada a causa de les irregularitats del flux d'extrusió. Després del debinding a 600 °C i el sinteritzat a 1400 °C durant 70 minuts, les mostres no han patit variacions dimensionals considerables ni defectes relacionats amb una eliminació incorrecta de l'aglutinant, el que indicaria que l'eliminació de l'aglutinant i el sinteritzat s'han realitzat amb èxit. Les contraccions observades són lleugerament anisotropies amb un valor d'entre 13,5 i 14,3 % per als costats i d'entre 17,3 i 18,52 % per a l'alçada. Aquests valors es troben dins de les contraccions esperades. Per a les mostres sinteritzades s'han obtingut unes porositats mitjanes d'entre el 20,5 % i el 24,1 %. Aquesta porositat es podria reduir millorant el flux de material extruït i optimitzant els paràmetres d'impressió i de sinterització. L'estudi mitjançant SEM-EDS de la superfície de les mostres de WC-5%Ni sinteritzades ha demostrat que, malgrat les porositats, s'ha obtingut una massa contínua de material sense rastres de l'aglutinant composta de W, C i petites quantitats de Ni envoltant el W, cosa que coincideix amb la composició desitjada (WC-5%Ni). Per tant, es creu que el procés d'eliminació i sinteritzat s'ha realitzat amb èxit i que, un cop solucionat el problema del flux irregular d'extrusió i optimitzats els paràmetres d'impressió i de sinterització, seria possible obtenir mostres molt més denses. Les emissions generades per elaborar aquest treball s'estimen en 34,6 kg de CO₂eq. A l'utilitzar càrrega inorgànica reciclada s'haurien reduït les emissions relacionades amb l'obtenció de la matèria primera en un 81,2 %.

Paraules clau: Manufactura additiva, impressió 3D, MEAM-HP, grànuls, aglutinant, peça en verd, sinterització, Carney, PLA, WC-Ni, Ti64AlV, Grafit.

Àrees temàtiques: Enginyeria de materials, manufactura additiva.

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado la viabilidad de imprimir piezas metálicas y/o cerámicas mediante impresión 3D usando la técnica MEAM-HP (*Material Extrusion Additive Manufacturing of Highly-Filled Polymers*) empleando gránulos de PLA cargados con diferentes tipos de carga inorgánica reciclada suministrados por la empresa Colfeed (gránulos de PLA + 20 % en volumen de grafito, PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V y PLA + 48 % en volumen de WC-5%Ni). En la MEAM-HP, un termoplástico (aglutinante) altamente cargado de partículas inorgánicas se introduce en un cabezal extrusor móvil en donde se funde a la vez que es empujado a través de una boquilla. El movimiento del cabezal respecto de la cama de impresión permite depositar el material extruido capa a capa para construir un objeto tridimensional (pieza en verde). La pieza en verde se somete entonces a un ciclo térmico a elevada temperatura en donde se elimina el componente polimérico y se promueve que las partículas inorgánicas se fusionen entre ellas, lo que provoca la densificación de la pieza. Para la impresión de las piezas se ha empleado un cabezal extrusor de husillo suministrado por la empresa Tumaker al cual se le han realizado varias modificaciones (por ejemplo, rediseño de la tolva) para que pueda emplear los gránulos como materia prima. Las propiedades características de los gránulos (como, por ejemplo, su fluidez, geometría, distribución del tamaño de partícula o ángulo de reposo) se han estudiado para poder diseñar la tolva. Para el estudio de la fluidez de los gránulos se ha diseñado e impreso en 3D un embudo de Carney, obteniendo unos resultados de flujo similares a los obtenidos al emplear un embudo de Carney comercial, y, por lo tanto, demostrando la viabilidad de estudiar la fluidez de los gránulos empleando el embudo impreso en 3D. Los resultados de flujo obtenidos en el ensayo de Carney coinciden con el tipo de flujo observado al hacer pasar los gránulos por la tolva. Los gránulos con tamaños de partícula máximos de alrededor de 2,5 mm y distribuciones del tamaño de partícula ancha y bimodal son los que han presentado una mejor fluencia, mientras que los gránulos con tamaños de partícula máximos < 0,8 mm y distribuciones estrechas son los que han presentado una peor fluencia debido a que se reduce su densidad aparente y se incrementa el efecto de las fuerzas electrostáticas y la adsorción de la humedad aumentando la cohesión de los gránulos y la probabilidad de atoramientos en la tolva.

Al intentar extruir los gránulos se ha podido observar que, independientemente de la temperatura y del shear rate empleados, el flujo de material extruido es irregular lo que ha impedido el correcto estudio de los parámetros de impresión. El flujo irregular sería debido a una insuficiente alimentación de material al husillo causada por la generación de agujeros de rata alrededor del husillo. Los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC-5%Ni son los que han

presentado un flujo de materia extruido más regular debido a su mayor tamaño de partícula, lo que facilita a la tolva y al husillo el transporte de los gránulos al interior del barril. Todo y el flujo irregular de material, se ha podido determinar que los gránulos son imprimibles en un rango de temperaturas de entre 150 y 210 °C, siendo el rango de 180 a 200 °C el que ha dado los mejores resultados. Además, también ha sido posible imprimir muestras prismáticas cuadrangulares de PLA + 48 % en volumen de WC-5%Ni con dimensiones en los lados de la base relativamente similares entre ellas (desviación estándar de entre 0,9 y 1,3 mm) pero sin poder lograr la altura deseada debido a las irregularidades del flujo de extrusión. Tras el debinding a 600 °C y el sinterizado a 1400°C durante 70 minutos, las muestras no han sufrido variaciones dimensionales considerables ni defectos relacionados con una eliminación incorrecta del aglutinante lo que indicaría que la eliminación del aglutinante y sinterizado se ha realizado con éxito. Las contracciones observadas son ligeramente anisotropías con un valor de entre 13,5 y 14,3 % para los lados y de entre 17,3 y 18,52 % para la altura. Estos valores se encuentran dentro de las contracciones esperadas. Para las muestras sinterizadas se han obtenido unas porosidades medias de entre el 20,5 y el 24,1 %. Esta porosidad se podría reducir mejorando el flujo de material extruido y optimizando los parámetros de impresión y de sinterización. El estudio mediante SEM-EDS de la superficie de las muestras de WC-5%Ni sinterizadas ha demostrado que, todo y las porosidades, se ha obtenido una masa continua de material sin rastros del aglutinante compuesta de W, C y pequeñas cantidades de Ni rodeando al W, lo que coincide con la composición esperada (WC-5%Ni). Por lo tanto, se cree que el proceso de eliminación y sinterizado se ha realizado de forma exitosa y que, una vez solucionado el problema del flujo de extrusión y optimizados los parámetros de impresión y de sinterización sería posible obtener muestras mucho más densas. Las emisiones generadas para elaborar este trabajo se estiman en 34,6 kg de CO₂eq. Al emplear carga inorgánica reciclada se habrían reducido las emisiones relacionadas con la obtención de la materia prima en un 81,2 %.

Palabras claves: Manufactura aditiva, impresión 3D, MEAM-HP, gránulos, aglutinante, pieza en verde, sinterización, Carney, PLA, WC-Ni, Ti64AlV, Grafito.

Áreas temáticas: Ingeniería de materiales, manufactura aditiva.

ABSTRACT

This work studies the feasibility of printing metallic and/or ceramic parts by means of 3D printing applying the MEAM-HP technique (Material Extrusion Additive Manufacturing of Highly-Filled Polymers) using PLA granules loaded with different types of recycled inorganic filler supplied by the Colfeed company (granules of PLA + 20 % vol. graphite, PLA + 47 % vol. Ti6Al4V and PLA + 48 % vol. WC-5%Ni). In the MEAM-HP, a highly loaded thermoplastic with inorganic particles is fed into a mobile extruder head where it is melted and pushed through a die. The movement of the head with respect to the print bed allows the extruded material to be deposited layer by layer to build a three-dimensional object (green part). The green part is then subjected to a thermal cycle at high temperature where the polymeric component is eliminated and the inorganic particles are fused together, which causes the densification of the part. For the printing of the parts, a screw extruder head supplied by the Tumaker company has been used to which several modifications have been made (for example, redesign of the hopper) so that it can use the granules as raw material. The characteristic properties of the granules (such as their fluidity, geometry, particle size distribution or angle of repose) have been studied in order to design the hopper. For the study of the fluidity of the granules, a Carney funnel has been designed and printed in 3D, obtaining flow results similar to those obtained when using a commercial Carney funnel, and therefore, demonstrating the feasibility of studying the fluidity of the granules using the 3D printed funnel. The flow results obtained in the Carney test are consistent with the type of flow observed when the granules flow through the hopper. Granules with maximum particle sizes of around 2,5 mm and wide and bimodal particle size distributions have shown the best flow, while granules with particle sizes < 0,8 mm and narrow distributions have shown the worst flow due to its apparent density being reduced and the effect of electrostatic forces and moisture adsorption increasing, with, at the same time, boost the cohesion of the granules and the probability of clogging in the hopper.

When trying to extrude the granules, it has been observed that, regardless of the temperature and shear rate used, the flow of extruded material is irregular, which has prevented the correct study of the printing parameters. Irregular flow would be due to insufficient feed of material to the screw caused by the generation of rat holes around the screw. The granules of PLA + 48 % in volume of WC-5%Ni are the ones that have presented a more regular flow of extruded material due to their larger particle size, which makes it easier for the hopper and the screw to transport the granules inside the barrel. Despite the irregular flow of material, it has been

possible to determine that the granules are printable in a temperature range between 150 and 210 °C, with the range of 180 to 200 °C being the one that has given the best results. In addition, it has also been possible to print green samples of PLA + 48 % vol. WC-5%Ni with relatively similar side dimensions between them (standard deviation between 0,9 and 1,3 mm); the irregular flow of extrusion made not possible to obtain parts with the desired height. Dimensional accuracy could be increased by optimizing the printing parameters and improving the flow of extruded material. After debinding at 600 °C and sintering at 1400 °C for 70 minutes, the samples have not suffered considerable dimensional variations or defects related to the incorrect removal of the binder, which would indicate that the removal of the binder and sintering have been carried out successfully. The observed contractions are slightly anisotropic with a value between 13,5 and 14,3 % for the sides and between 17,3 and 18,52 % for the height. These values are within the expected contractions. For the sintered samples, average porosities between 20,5 and 24,1 % have been obtained. This porosity could be reduced by improving the flow of extruded material and optimizing printing and sintering parameters. The SEM-EDS study of the surface of the sintered WC-5%Ni samples has shown that, although the porosities, a continuous mass of material has been obtained without traces of the binder and composed of W, C and small amounts of Ni surrounding the W, which coincides with the expected composition (WC-5%Ni). Therefore, it is believed that the removal and sintering process has been carried out successfully and that, once the material flow problem has been solved and the printing and sintering parameters have been optimized, it would be possible to obtain much denser samples. The emissions generated during this work are estimated at 34,6 kg of CO₂eq. By using recycled inorganic filler, the emissions related to obtaining the raw material would have been reduced by 81,2 %.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, MEAM-HP, granules, binder, green part, sintering, Carney, PLA, WC-Ni, Ti64AlV, Graphite.

Thematic areas: Materials engineering, additive manufacturing.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda del Dr. José María Cabrera, la Dr. Jessica Calvo y de CIM UPC.

Quiero agradecer a todos los trabajadores/investigadores de CIM UPC la enorme ayuda y atención brindada durante la elaboración de este trabajo. En especial a Louison, Roger y Joel quienes siempre han estado allí para ayudar y solucionar todas las dudas y problemas que pudieran surgir. Además, también quiero agradecer al profesor Crisantos Villalobos quien me ha ayudado y aconsejado sobre el uso del diferente equipamiento disponible en las instalaciones de la Universidad.

Y finalmente, a mi familia que ha estado apoyándome en todos los instantes de mi vida.

GLOSARIO

AM: Fabricación aditiva

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BMD: *Bound Metal Deposition*

CAD: Diseño asistido por computador

CIM: Manufactura integrada por computador

EBM: Fusión por haz de electrones

EDS: Espectroscopia de energía dispersada

FDC: *Fused deposition modeling of ceramics*

FDMet: *Fused deposition of metals*

FFF: Fabricación por filamento fundido

HIP: *Hot isostatic pressing*

I+D+i: Investigación, desarrollo e innovación

IP: Dirección del Protocolo de Internet

ISO: *International Organization for Standardization*

LC: *Láser Cladding*

MEAM: Manufactura aditiva basada en la extrusión

MEAM-HP: Extrusión de polímeros altamente cargados con partículas inorgánicas

MFI: *Melt flow index*

MIM: Moldeo por inyección de metales

MPIF: Federación de Industrias de Polvo de Metal

PIB: Producto interior bruto

PIM: Moldeo por inyección de polvo

SE: Electrones secundarios

SEM: Microscopio electrónico de barrido

SLM: Fusión selectiva por láser

SLS: Sinterización selectiva por láser

STL: Lenguaje de Triangulación Estándar

TFV: Tasa de flujo volumétrico

TPV: Tasa de producción volumétrica

UPC: Universidad Politécnica de Cataluña

Elementos/Compuestos

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

Al: Aluminio

Ni: Níquel

PA: Poliamida

PE: Polietileno

PEG: Polietilenglicol

PEI: Polietilenimina

PLA: Ácido poliláctico

PMMA: Polimetilmetacrilato

PP: Polipropileno

PVB: Butiral de polivinilo

SA: Ácido esteárico

Ti: Titanio

V: Vanadio

WC: Carburo de tungsteno

ÍNDICE

RESUM	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS	vii
GLOSARIO	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CIM UPC y el proyecto VIVALDI	1
1.2 Motivación y origen del trabajo	2
1.3 Objetivo y alcance del proyecto	4
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 La problemática del moldeo por inyección de polvos y la aparición de la fabricación aditiva	5
2.2 La Fabricación aditiva	7
2.3 La problemática de las técnicas actuales de fabricación aditiva y la aparición de la MEAM-HP	10
2.4 La fabricación aditiva basada en la extrusión de polímeros altamente cargados (MEAM-HP)	12
2.4.1 La técnica MEAM-HP	12
2.4.2 Ventajas de la MEAM-HP	14
2.4.3 Estado actual de la MEAM-HP	15
2.4.4 MEAM-HP vs PIM	17
2.4.5 Componentes de la materia prima empleada en la MEAM-HP	18
2.4.6 Eliminación del aglutinante	22
2.4.7 Sinterización	25
2.4.8 Características de las piezas obtenidas mediante MEAM-HP	26
3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA EMPLEADA EN EL PROYECTO VIVALDI..	29
3.1 Obtención del polvo inorgánico	31
3.1.1 Atomización centrífuga	32
3.1.2 Atomización de plasma generado por microondas	33
3.2 Obtención de los gránulos mediante mezclado coloidal	34

4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS GRÁNULOS PARA EL DISEÑO DE UNA TOLVA	37
4.1 Flujo de los gránulos.....	37
4.2 Densidad aparente de los gránulos	39
4.3 El test de Carney funnel	40
4.4 Selección de los parámetros de diseño de la tolva	41
5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	44
5.1 El flujo de material extruido	44
5.2 El diámetro de la boquilla.....	46
5.3 Dimensiones del filamento extruido y altura de capa	47
5.4 Velocidad de extrusión	48
5.5 La relación $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$	50
5.6 Densidad de relleno y superposición.....	52
5.7 Patrón de relleno.....	53
5.8 Temperatura de extrusión y de la cama de impresión	54
6. MATERIALES Y MÉTODOS	56
6.1 Materia prima	56
6.2 Sistema de impresión	58
6.2.1 La impresora AIMPLAS	58
6.2.2 Trabajo realizado en la fabricación de la impresora AIMPLAS.....	60
6.2.3 Cabezal extrusor empleado para la extrusión de los gránulos	69
6.2.4 Adaptación del cabezal extrusor a AIMPLAS y a los gránulos.....	72
6.3 Obtención de las propiedades características de los gránulos y de las dimensiones mínimas de la tolva.....	76
6.3.1 Obtención de la geometría y distribución del tamaño de los gránulos	76
6.3.2 Obtención del ángulo de reposo	78
6.3.3 Metodología Carney (flujo de Carney y densidad aparente)	79
6.3.4 Ensayo de fluencia en la tolva	82
6.4 Software de impresión	82
6.4.1 PrusaSlicer	82
6.4.2 Duet Web control	87
6.5 Selección de los parámetros de impresión.....	89
6.5.1 Obtención del flujo de extrusión de la materia prima en forma de filamentos.....	89

6.5.2 Obtención del flujo de extrusión de la materia prima en forma de gránulo.....	92
6.5.3 Dimensiones y parámetros de impresión de las muestras	94
6.6 Eliminación del aglutinante y sinterización de las muestras impresas	97
6.7 Obtención de densidad y porosidad por Arquímedes	100
6.8 Preparación de las muestras	101
6.9 Estudio de las muestras mediante SEM-EDS	101
7. RESULTADOS Y DISCUSIONES	105
7.1 Determinación de las propiedades características de los gránulos y dimensiones mínimas de la tolva.....	105
7.1.1 Geometría de los gránulos	105
7.1.2 distribución del tamaño de partícula de los gránulos.....	107
7.1.3 Ángulo de reposo de los gránulos e inclinación mínima requerida en la tolva	110
7.1.4 Ensayo de Carney	111
7.1.5 Fluencia de los gránulos en la tolva fabricada	114
7.2 Estudio del flujo de material extruido y determinación de los parámetros de impresión	115
7.2.1 Flujo de extrusión de la materia prima en forma de filamentos.....	116
7.2.2 Flujo de extrusión de la materia prima en forma de gránulo	119
7.2.3 Selección de los parámetros de impresión de los gránulos	122
7.2.4 Estudio dimensional de las muestras impresas antes del debinding y sinterizado (muestras en verde)	125
7.2.5 Estudio dimensional de las muestras impresas tras el debinding y sinterizado	128
7.2.6 Estudio mediante SEM-EDS de los gránulos y las muestras impresas	133
8. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	139
CONCLUSIONES	144
TAREAS POR REALIZAR EN FUTUROS ESTUDIOS	149
ANÁLISIS ECONÓMICO	150
BIBLIOGRAFÍA.....	154
ANEXOS.....	167
A.1 Tablas de referencia de las conexiones de los cabezales y el BLTouch	167
A.2 Planos piezas impresas.....	169

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CIM UPC y el proyecto VIVALDI

Este trabajo ha sido realizado en colaboración con CIM UPC. CIM UPC es un centro de innovación y tecnología especializado en tecnologías avanzadas de la producción basadas en la manufactura integrada por computador (CIM) (**Figura 1.1**). Se trata de una fundación sin ánimo de lucro que se encuentra adscrita a la Universidad Politécnica de Cataluña y tiene la misión de ayudar a las empresas y a los profesionales a incrementar su capacidad tecnológica y de innovación ofreciendo servicios tecnológicos al sector industrial y programas formativos específicos. En la actualidad, el Área de I+D+i de CIM UPC dispone de cuatro líneas principales de investigación desde donde se llevan a cabo proyectos competitivos para avanzar el nivel de madurez tecnológica de la fabricación aditiva (AM) [1]:

- Investigación focalizada en la tecnología: *Direct Ink Writing* y *Hybrid 3D Manufacturing*.
- Búsqueda de aplicación tecnológica en el sector médico y de la construcción: *3D Printing for Health* y *Concrete 3D Printing*.

Además de estas líneas de investigación, a principios del año 2022, se inició una nueva línea de investigación conocida con el nombre de *proyecto VIVALDI*. El presente trabajo forma parte de este proyecto.



Figura 1.1. Planta Piloto de CIM UPC [2].

1.2 Motivación y origen del trabajo

En el informe “*3D Printing Metals Market - Global Forecast to 2024*” realizado por *Markets&Markets*, se estima que el mercado mundial de metales de impresión 3D en 2019 era de 774 M€ y que alcanzará los 3.159 M€ en 2024 con una tasa de crecimiento anual del 32,5 % entre 2019 y 2024 [3]. Actualmente, esta demanda de metales para la fabricación 3D se satisface principalmente a partir de polvos fabricados mediante tecnologías de atomización por gas, que generan un polvo de dimensiones y calidad adecuadas, pero de coste elevado [4]. El proyecto VIVALDI surge de la necesidad de encontrar vías para la obtención y uso de polvos reciclados para mejorar la sostenibilidad del proceso, así como reducir el coste de producción.

El objetivo general del proyecto VIVALDI es la valorización de residuos metálicos y cerámicos mediante la generación de nuevas materias primas para su uso en procesos de fabricación aditiva, como el láser cladding (LC), la fusión selectiva por láser (SLM) o la extrusión de polímeros altamente cargados con partículas inorgánicas (MEAM-HP). En el proyecto VIVALDI se investiga la obtención de polvo reciclado de materiales altamente tecnológicos, como titanio (Ti), aluminio (Al) o carburo de tungsteno (WC) empleando diferentes rutas y/o procesos, como la atomización centrífuga o el plasma con microondas; dichas tecnologías presentan como ventaja la elevada calidad del polvo de salida (muy esférico) y el bajo consumo energético. Este polvo revalorizado se pretende incorporar a la materia prima (*feedstock*) empleada en las tecnologías de fabricación aditiva (por ejemplo, mezclando el polvo con un polímero termoplástico para ser empleado como materia prima para MEAM-HP) desarrollando, al mismo tiempo, nuevas máquinas de impresión 3D que puedan hacer uso de esta materia prima. Por lo tanto, el proyecto se beneficia de la sinergia al investigar simultáneamente procesos de valorización de residuos y equipos de impresión 3D, con objeto de ofertar materia prima y equipamiento actualmente no disponible en mercado.

El proyecto VIVALDI se lleva a cabo en un consorcio de 6 pymes que cubren la cadena de valor completa (**Figura 1.2**). Este consorcio incluye dos empresas expertas en reciclaje de materiales (GRUPAL ART y BCIRCULAR), una empresa del sector del metal que pretende aprovechar sus residuos para emplearlos en sus procesos de Láser Cladding (TMCOMAS), una empresa de fabricación de materia prima para fabricación aditiva (COLFEED) y dos fabricantes de equipos de fabricación aditiva (BCN3D, SAMYLABS). Además, el proyecto cuenta con la colaboración de los centros de investigación Eurecat, CIM UPC, ICV-CSIC y CSIC-CENIM. El presupuesto del proyecto es de 1.720.818 € [4].



Figura 1.2. Distribución territorial del consorcio del proyecto VIVALDI [4].

El proyecto VIVALDI se compone de 6 actividades vinculadas de la forma que se muestra en los esquemas presentados en las **Figuras 1.3 y 1.4**. De las 6 actividades totales, las 5 primeras corresponden a actividades de investigación industrial (A.1 a A.5) mientras que la última actividad corresponde a desarrollo experimental (A.6), en dónde se lleva a cabo la validación de la investigación realizada en las 5 primeras actividades. Dentro del proyecto VIVALDI, CIM UPC y, en consecuencia, el presente trabajo, se encarga de la investigación en equipos, materiales y técnicas de fabricación aditiva por MEAM-HP (actividad A.4).

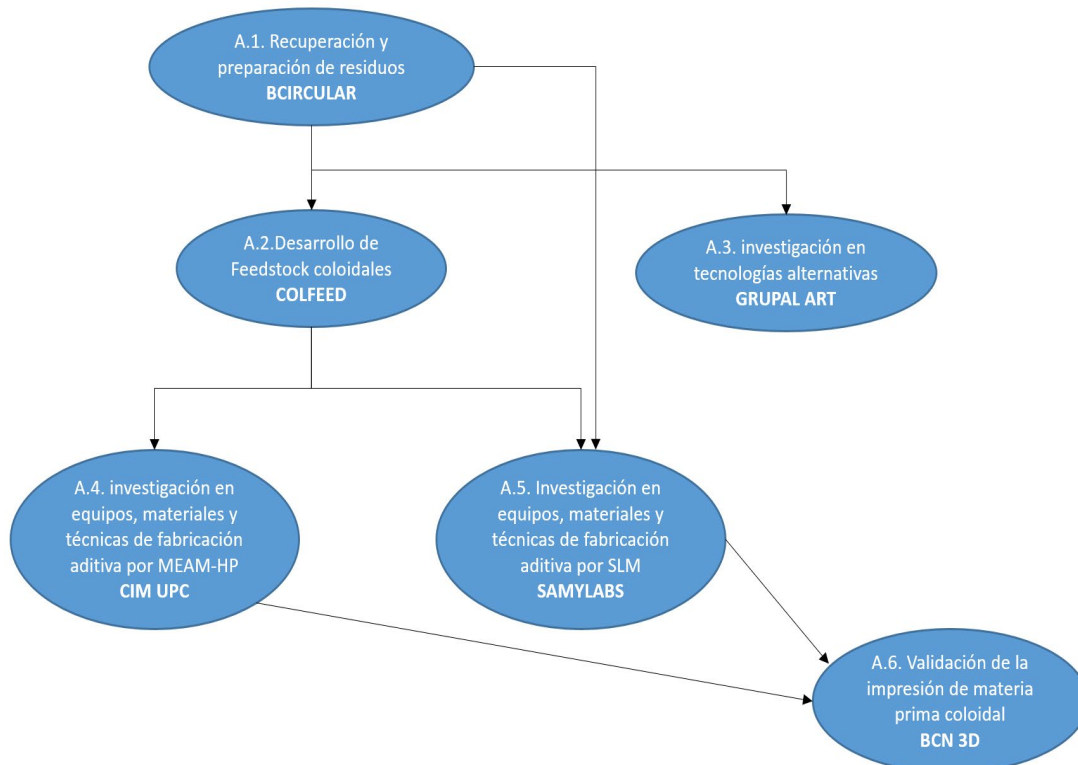


Figura 1.3. Esquema del plan de trabajo en donde se describen las relaciones entre las 6 actividades del proyecto Vivaldi. (Fuente: esquema adaptado de [4]).

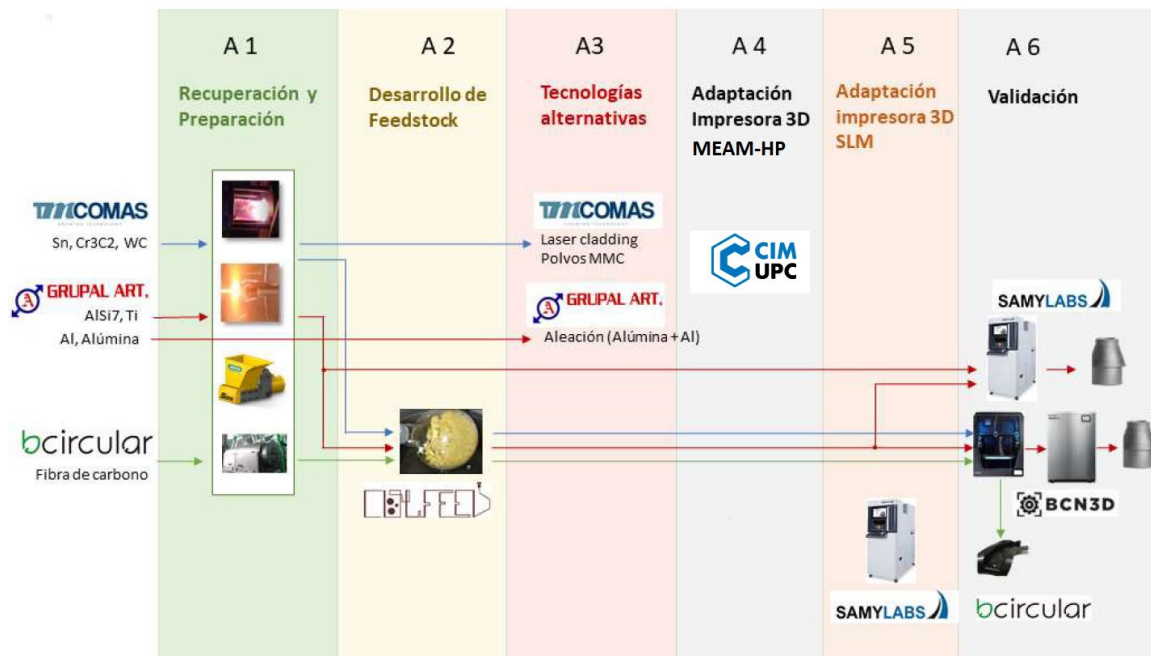


Figura 1.4. Esquema de la complementariedad de las empresas en la cadena de valor. (Fuente: esquema adaptado de [4]).

1.3 Objetivo y alcance del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la viabilidad de fabricación de piezas metálicas y/o cerámicas mediante manufactura aditiva basada en la extrusión (MEAM) empleando, como materia prima, gránulos poliméricos de PLA cargados con diferentes tipos de carga inorgánica obtenida de la revalorización de residuos metálicos y cerámicos. Para esto, se diseñará y fabricará un sistema de impresión que sea capaz de emplear estos gránulos a la vez que se estudian las características deseables que han de presentar los gránulos (como, por ejemplo, su geometría y distribución del tamaño de partícula) junto con sus parámetros de impresión, eliminación del componente polimérico y sinterización más adecuados para poder fabricar piezas con la mayor densidad y propiedades mecánicas posibles.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 La problemática del moldeo por inyección de polvos y la aparición de la fabricación aditiva

La técnica PIM (moldeo por inyección de polvo) apareció a principio de los años treinta para ser empleada con polvos cerámicos, pero no fue hasta el inicio de los años setenta que se asentó como una tecnología capaz de producir piezas de gran complejidad geométrica empleando un gran abanico de materiales (polímeros, cerámicas, y metales) [5].

La PIM es una técnica híbrida que combina el moldeo por inyección y la pulvimetalurgia, lo que le permite compaginar las virtudes de ambas técnicas para fabricar, de forma rentable, elevadas cantidades de piezas geométricamente complejas con excelentes propiedades mecánicas, y tolerancias y acabados superficiales precisos [6-10]. En la actualidad, la PIM es empleada para fabricar componentes en un amplio abanico de mercados, entre los que se encuentran el aeronáutico, militar o biomédico [11]. En la **Figura 2.1** se presentan algunos ejemplos de piezas obtenidas mediante PIM.



Figura 2.1. Conjunto de piezas fabricadas mediante PIM [12].

El proceso PIM se esquematiza en la **Figura 2.2**. En primer lugar, el polvo inorgánico (carga) se combina con un aglutinante polimérico (*binder*), para esto, los dos componentes se mezclan mecánicamente hasta que las partículas de polvo inorgánico se encuentran uniformemente

recubiertas por el aglutinante. Una vez obtenida una mezcla homogénea, esta se enfría y se le realiza un granulado para convertirla en pellets. Seguidamente, los pellets se alimentan a una inyectora que se encarga de fundirlos y de inyectarlos a elevada presión en un molde. A continuación, la pieza moldeada (comúnmente llamada “pieza en verde”) se enfría y se expulsa del molde. Tras esto, a la pieza en verde se le realiza un debinding para remover el aglutinante. El debinding normalmente se lleva a cabo en varias etapas a través de las cuales se elimina la mayor parte del aglutinante (normalmente mediante un solvente) de forma previa al ciclo térmico de debinding y sinterizado, dejando solo el suficiente para que la pieza mantenga su integridad estructural y pueda ser manipulada [13]. Tras retirar parte del aglutinante, la pieza presenta porosidad y se le suele dar el nombre de “pieza en marrón”; las porosidades facilitarán la eliminación del aglutinante restante durante el posterior tratamiento térmico [14-16]. Finalmente, la pieza en marrón se somete a un ciclo térmico de debinding y sinterizado en donde se calienta a elevada temperatura en una atmósfera protectora para remover el componente polimérico restante y hacer que las partículas inorgánicas de polvo se fusionen entre ellas, lo que provoca la densificación de la pieza. La densidad obtenida tras el sinterizado es, en la mayoría de los casos, superior al 98 % de la teórica [17] siendo posible realizar un HIP (*Hot Isostatic Pressing*) a la pieza tras el sinterizado para lograr densidades de hasta el 99,9% [7][18-19].

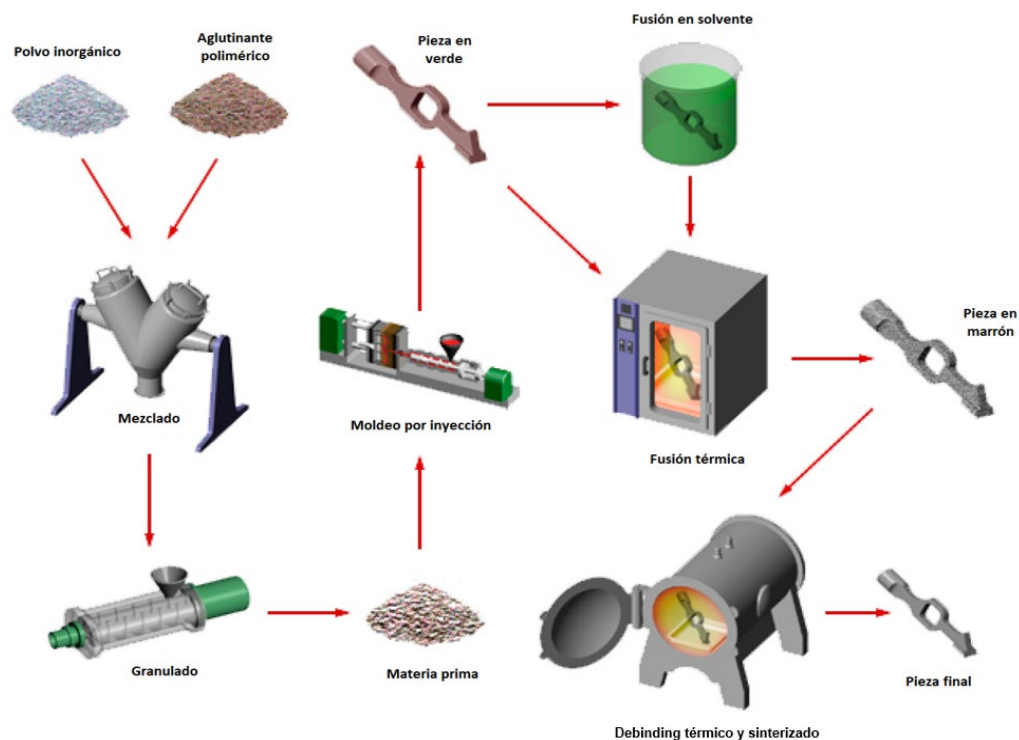


Figura 2.2. Proceso de manufactura de piezas mediante PIM [20].

La PIM tiene la problemática de la poca flexibilidad que ofrece a la hora de realizar cambios en el diseño de las piezas pues un pequeño cambio en el diseño requiere de la fabricación de un nuevo molde; estos moldes pueden valer más de 90.000 € y requerir de un tiempo de fabricación de hasta 13 semanas, o incluso más en el caso de geometrías muy complejas. Esto hace que la PIM sea una técnica valida únicamente cuando se puede amortizar el elevado precio de los moldes, lo que suele implicar que el volumen de producción de las piezas sea de cientos de miles y su diseño no se altere durante un periodo, normalmente, superior a 5 años [21]. Como respuesta a esta problemática, en la última década ha aparecido una prometedora técnica de fabricación que recibe el nombre de Fabricación Aditiva (AM).

2.2 La Fabricación aditiva

Las normas ASTM / ISO describen la fabricación aditiva como: “Proceso de unión de materiales capa a capa para hacer objetos modelados en 3D, en oposición a las metodologías de fabricación sustractivas, tales como el mecanizado tradicional” [22]. El nombre común con el que se conoce a la fabricación aditiva es “impresión 3D” y a las máquinas de fabricación aditiva se las llama “impresoras 3D”. En la actualidad existen una gran variedad de técnicas de impresión 3D, las cuales se pueden clasificar en 7 familias en función del método empleado para unir el material capa a capa [23], **Figura 2.3**.

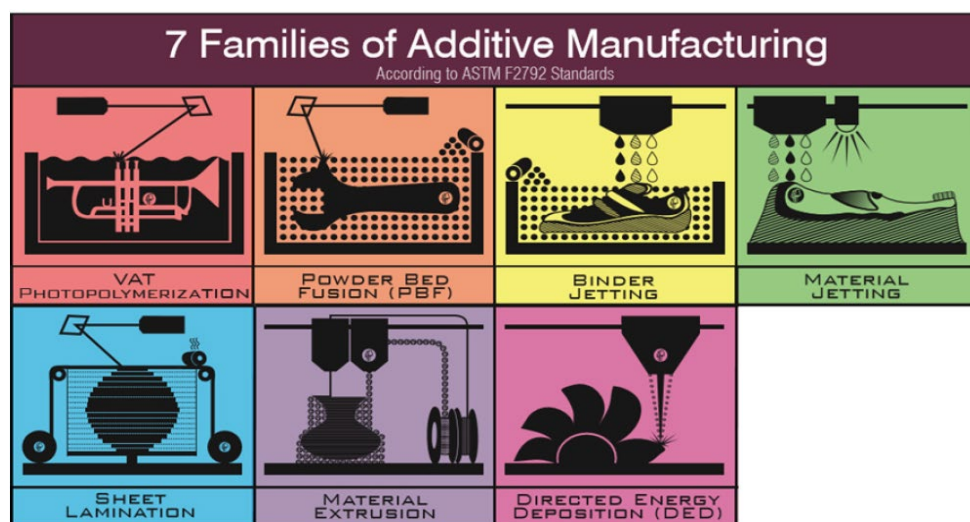


Figura 2.3. Las 7 familias en las que se pueden clasificar las diferentes técnicas de manufactura aditiva de acuerdo con la norma ASTM (Fuente: hybridmanutech).

La fabricación aditiva ofrece un enfoque alternativo a los procesos de fabricación convencionales (**Figura 2.4**), lo que hace posible la fabricación de piezas de elevada complejidad geométrica sin emplear moldes siendo posible modificar su diseño de forma rápida y sencilla. El hecho de no tener que emplear moldes no solo da como resultado ahorros en costes, sino también en tiempos de prototipado y producción muchos más cortos. Otra ventaja significativa de la fabricación aditiva reside en la libertad de diseño inherente provocada por la fabricación de piezas capa por capa, lo que permite la fabricación de objetos con geometrías que serían difíciles, o incluso imposibles de producir, utilizando procesos de fabricación sustractivos o conformativos convencionales (**Figura 2.5**). Esta mayor libertad de diseño que ofrece la AM también tiende a facilitar la reducción, o incluso en algunos casos, la eliminación completa de pasos adicionales de conformado, corte y ensamblaje [24-25].

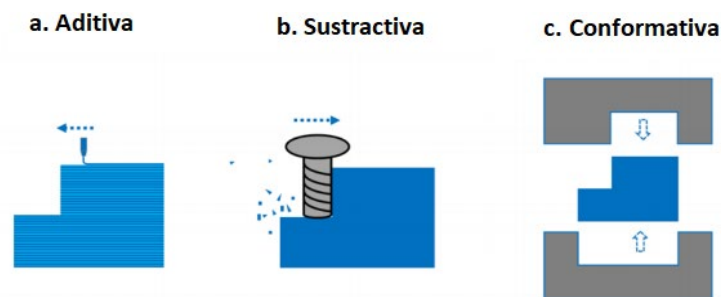


Figura 2.4. Tres tipos principales de procesos de fabricación. (a) Método de fabricación aditiva en el que un objeto se construye "capa por capa". (b) Método de fabricación sustractivo en el que se construye un objeto eliminando el exceso de material de un objeto másico mediante mecanizado. (c) Método de fabricación conformativa en el que se forma un objeto dentro de moldes prefabricados [25].

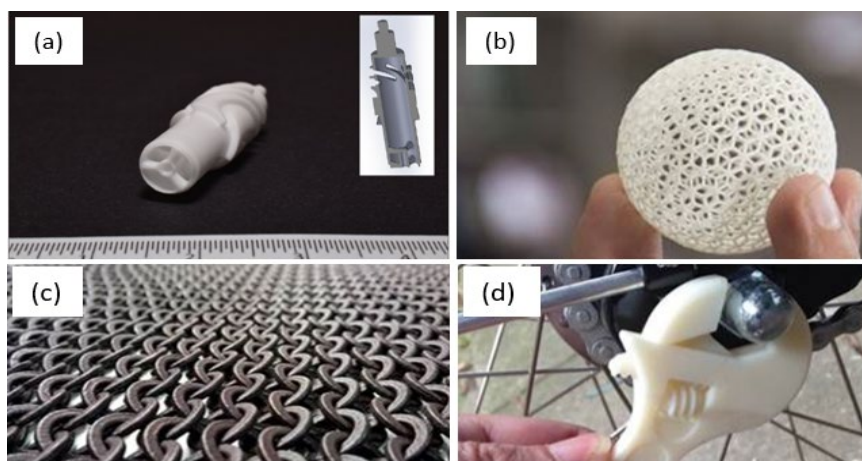


Figura 2.5. Ejemplos de geometrías que solo son posibles de lograr con AM. (a) Bomba de sangre con dos puntos de apoyo [26]. (b) esfera imposible de fabricar con moldes. (c) Cadenas impresas con los eslabones ya unidos entre sí. (d) Una llave inglesa fabricada de una sola pieza [25].

La metodología empleada por las tecnologías de fabricación aditiva se basa en tres etapas principales: (1) obtención de un modelo 3D imprimible, (2) preparación del modelo 3D para su impresión y (3) impresión del modelo. Este proceso de fabricación se esquematiza en la **Figura 2.6** y suele constar de los siguientes pasos [5][27-28]:

1. La elaboración de un modelo 3D imprimible es el primer paso. El modelo se suele crear empleando un programa de diseño asistido por computadora (CAD), todo y que también existen métodos más modernos de ingeniería inversa como el escaneado 3D o la tomografía por resonancia magnética. Normalmente, el modelo 3D se guarda en forma de archivo de Lenguaje de Triangulación Estándar (STL) pero, aún y así, existen más de 35 alternativas a este formato, cuatro de las más notables son: AMF, 3MF, OBJ y PLY [29-30].
2. Sin embargo, el formato STL y sus alternativas no son reconocidos directamente por las impresoras 3D, lo que hace que se requiera de un programa especializado, conocido como laminador o “rebanador”, que actúe de intermediario entre el modelo 3D y la impresora. En la actualidad, existen una gran cantidad de programas de laminado en el mercado, algunos de los más famosos son PrusaSlicer y Simplify3D. El programa laminador permite configurar los parámetros de impresión del modelo 3D y exportar el resultado final en forma de archivo “G-Code”, que no es más que el modelo troceado en finas láminas y transformado en órdenes de movimiento que puede comprender y seguir la impresora 3D para fabricar el objeto.
3. Una vez fabricada, la pieza se retira de la zona de impresión y, si es necesario, se retiran las estructuras de soporte y el exceso de material de construcción no unido.
4. En algunos casos puede ser necesario un posprocesado para obtener la pieza final como, por ejemplo, un tratamiento térmico o un pulido.

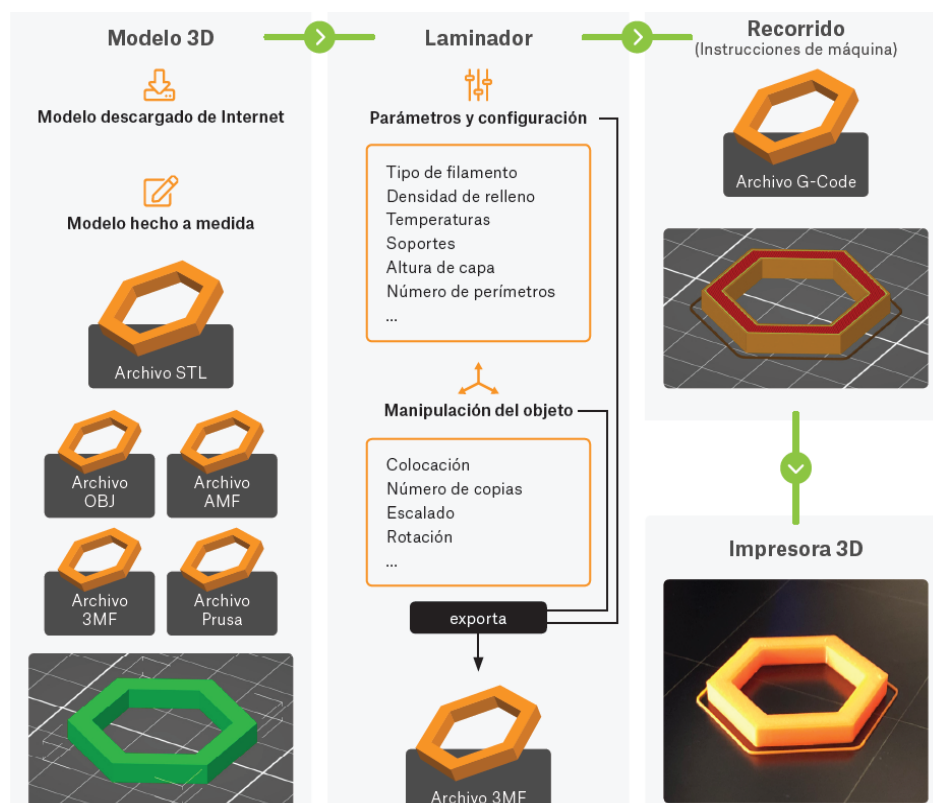


Figura 2.6. Pasos individuales para obtener una pieza mediante fabricación aditiva [31].

2.3 La problemática de las técnicas actuales de fabricación aditiva y la aparición de la MEAM-HP.

Si bien es cierto que hoy en día existe un gran abanico de tecnologías de impresión 3D, el mercado de las impresoras 3D de fabricación aditiva sigue estando ocupado en gran parte por las tecnologías de fabricación aditiva basadas en lechos de polvos (sobre todo en la fabricación de piezas metálicas). En la **Figura 2.7** se esquematiza el funcionamiento de varias de las tecnologías de lecho de polvo más comunes. Las tecnologías de lecho de polvo emplean una plataforma de construcción que contiene polvo del material con el cual se desea fabricar la pieza. Este polvo se une capa a capa en puntos específicos para fabricar la pieza; existen diferentes métodos empleados para unir las partículas de polvo, como, por ejemplo, fundiéndolas o sinterizándolas mediante fuentes de energía (como láser o haz de electrones, **Figura 2.7a**), o uniéndolas mediante binders poliméricos (**Figura 2.7b**). Una vez finalizada una capa de la pieza, la plataforma desciende y se vuelve a cubrir con el polvo (generalmente empleando un rodillo); este procedimiento se repite hasta finalizar la pieza [28][32].

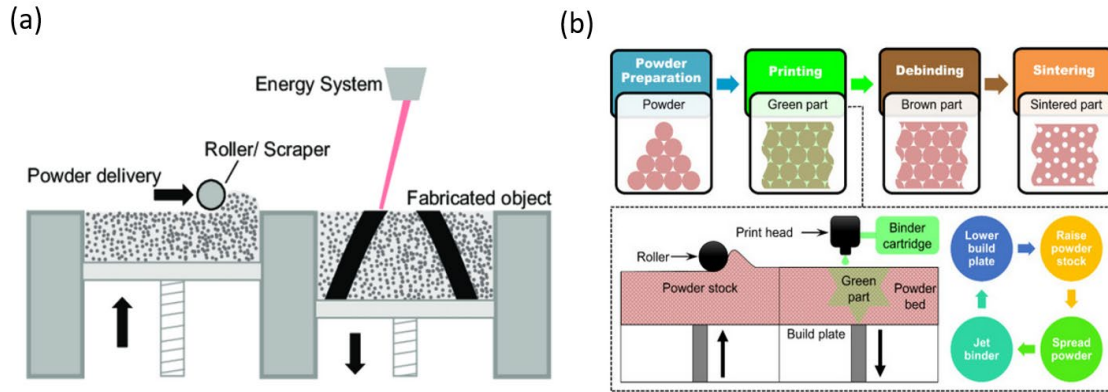


Figura 2.7. Esquema del proceso de fabricación empleado por las técnicas de manufactura aditiva basadas en lecho de polvo más comunes. (a) fusión/sinterización por lecho de polvo; entre las técnicas más populares se encuentra la fusión por haz de electrones (EBM), la fusión selectiva por láser (SLM) o la sinterización selectiva por láser (SLS) [28]. (b) Binder Jetting [33].

Una de las principales desventajas de las impresoras basadas en lechos de polvo es la necesidad de emplear un polvo que pueda esparcirse fácilmente en la cama. Esto hace que se deban emplear polvos con tamaños de partícula relativamente grandes (20-30 μm) y con una composición muy determinada, lo que limita su resolución final y dificulta su densificación (porosidad interna en las piezas). A esto hay que sumarle la dificultad añadida que supone trabajar con la materia prima en forma de polvo; algunos de estos polvos pueden llegar a ser muy volátiles y peligrosos requiriendo de una manipulación en cámaras de vacío por un operario muy calificado [34]. Además, el exceso de polvo debe de eliminarse de las piezas impresas lo que, dependiendo de la complejidad de la pieza, puede ser muy costoso. Por último, muchas de las impresoras basadas en lecho de polvo tienen un precio de entre 550k-1M€ [35] mientras que el precio de los polvos puede superar los 350 €/kg [36]. Todo esto encarece mucho el precio de las piezas (sobre todo si se equipara con el de las piezas fabricadas mediante procesos de fabricación más convencionales). A pesar de esto, si la pieza no puede ser obtenida mediante métodos convencionales, se puede justificar su elevado precio y esta es la razón por la que los componentes obtenidos empleando tecnologías de lecho de polvo son mucho más frecuentes en mercados como el militar o aeroespacial [35].

En los últimos años, la extremadamente elevada demanda por parte de la industria de tecnologías de fabricación aditiva más sencillas, seguras y económicas de emplear ha dado lugar a la aparición de una gran variedad de nuevas técnicas de fabricación aditiva [37]. Una de las

que tiene un futuro más brillante es la conocida como Fabricación aditiva basada en la extrusión de polímeros altamente cargados o *Material Extrusion Additive Manufacturing of Highly-Filled Polymers* (MEAM-HP). Se cree importante aclarar que esta tecnología recibe una gran cantidad de nombres diferentes en función de la materia prima y del fabricante que la emplee, algunos de estos nombres son: *Fused Deposition of Metals* (FDMet), *Metal Filament ME*, *Metal Pellet ME* o *Bound Metal Deposition* (BDM), entre otros.

2.4 La fabricación aditiva basada en la extrusión de polímeros altamente cargados (MEAM-HP)

2.4.1 La técnica MEAM-HP

La fabricación aditiva basada en la extrusión de polímeros altamente cargados (MEAM-HP) es una técnica que permite fabricar piezas metálicas o cerámicas de gran complejidad geométrica empleando una boquilla como único instrumento de conformado [5][38]. La MEAM-HP es un híbrido entre dos tecnologías. La primera tecnología es la PIM (moldeo por inyección de polvo) ya explicada en el **Apartado 2.1**. La segunda tecnología se conoce como manufactura aditiva basada en la extrusión (MEAM). En la MEAM, la materia prima (normalmente un termoplástico) es alimentada a un cabezal extrusor móvil calefactado el cual se encarga de fundirla y extruirla en forma de filamento a través de una boquilla. Los filamentos extruidos pueden ser depositados capa a capa para fabricar un objeto tridimensional gracias al movimiento relativo del cabezal extrusor respecto de la cama de impresión [5]. La MEAM fue desarrollada por S. Scott Crump en el 1988 y patentada por Stratasys Ltd. en 1989. Esta patente expiró en el 2009 haciendo posible la adopción en masa de la técnica [39]. En función de la forma en la que se encuentre la materia prima, existen varios tipos de cabezales de extrusión empleados en la MEAM [40]. Los cabezales más comunes se presentan en la **Figura 2.8**.

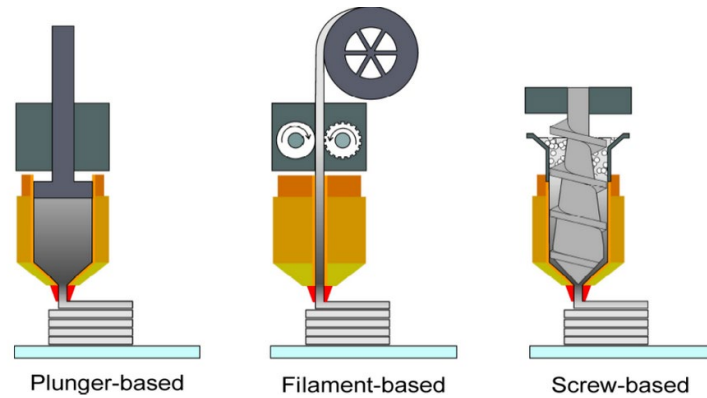


Figura 2.8. Tipos de cabezales de extrusión más comunes en la MEAM. De izquierda a derecha: cabezal de jeringa (materia prima líquida), cabezal de filamento (materia prima en filamento), cabezal de husillo (materia prima en forma de pellets) [5].

En la MEAM-HP, al igual que en la técnica PIM, se emplea como materia prima un aglutinante polimérico altamente cargado de partículas inorgánicas. Pero, a diferencia de la técnica PIM, en la MEAM-HP la materia prima se alimenta a un cabezal extrusor móvil por lo que el material extruido puede ser depositado capa a capa en puntos específicos para obtener un objeto tridimensional sin requerir el uso de moldes. La eliminación del aglutinante y el sinterizado se lleva a cabo mediante el mismo procedimiento que en la PIM (**Apartado 2.1**) [5]. En la **Figura 2.9** se presenta una representación esquemática del proceso más comúnmente empleado para la obtención de piezas mediante MEAM-HP.

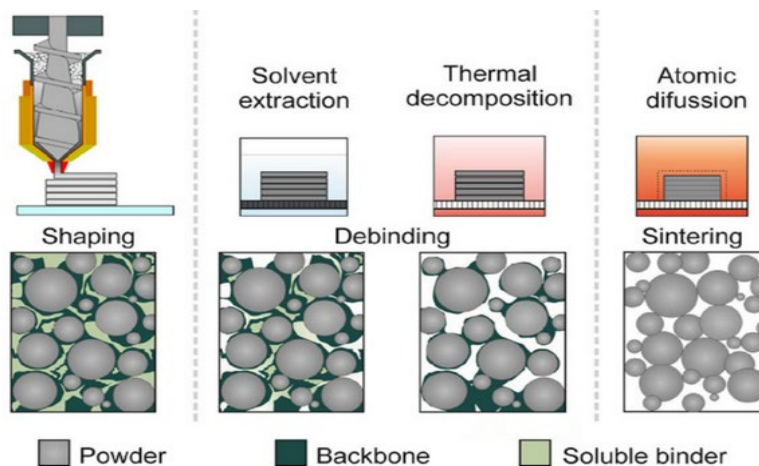


Figura 2.9. Esquema de los pasos llevados a cabo durante la fabricación de una pieza mediante MEAM-HP; en esta misma figura también se presenta la morfología de la pieza durante cada uno de los pasos. El aglutinante polimérico (binder) suele estar formado por dos tipos principales de polímeros, un polímero soluble (soluble binder) que se elimina mediante solvente antes del debinding térmico y sinterizado y un polímero insoluble (backbone) que se elimina térmicamente justo antes del sinterizado [5].

La MEAM-HP se puede emplear para imprimir piezas metálicas y cerámicas de todo tipo siendo el tamaño de la cama de impresión y el tiempo de impresión los principales factores limitantes del tamaño de la pieza [5]. En la **Figura 2.10** se presentan algunos ejemplos de piezas obtenidas empleando la MEAM-HP.

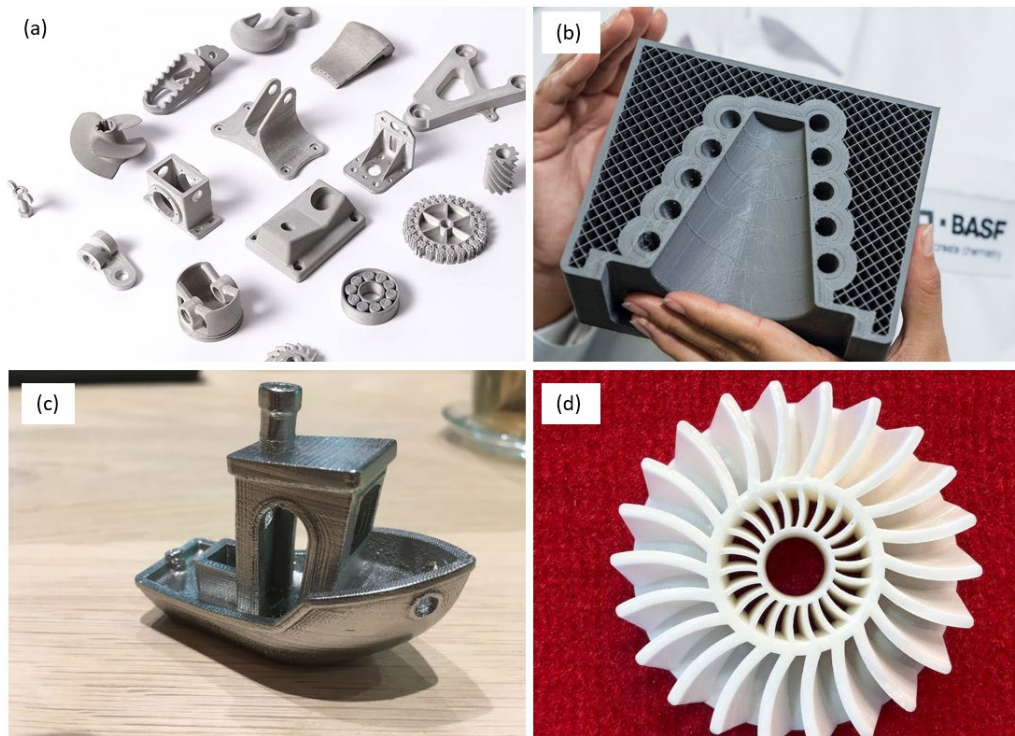


Figura 2.10. Fotografías de piezas obtenidas empleando la MEAM-HP. (a-c) piezas de acero inoxidable, (d) pieza cerámica. (Fuente: Basf.com).

2.4.2 Ventajas de la MEAM-HP

Al contrario que otras técnicas de fabricación aditiva, la infraestructura y la materia prima empleada en la MEAM-HP tiene un coste de adquisición y de operación bajo siendo posible disminuir considerablemente el precio de producción de las piezas; las impresoras 3D industriales basadas en lecho de polvo pueden llegar a costar más de 1 M€, por otro lado, una impresora de MEAM-HP tiene un precio de unos 150,000 € incluyendo el equipamiento de posprocesado [5][34][41]. Puesto que las piezas fabricadas empleando MEAM-HP requieren de un paso de sinterizado, las tensiones residuales son inferiores que las obtenidas en la mayoría de técnicas basadas en lecho de polvos. Al mismo tiempo, la MEAM-HP permite fabricar geometrías huecas completamente cerradas lo que no es posible empleando las técnicas

basadas en lecho de polvo pues el polvo no unido quedaría atrapado en su interior. Todo esto hace de la MEAM-HP una técnica muy atractiva que puede ser adoptada por una porción mucho mayor del sector industrial manufacturero [42].

2.4.3 Estado actual de la MEAM-HP

La técnica MEAM-HP se planteó por primera vez en los años 90 para la fabricación de piezas metálicas, nombrando a la técnica *Fused Deposition of Metals* (FDMet) [5]. Pero, puesto que el desarrollo de aglutinantes para las partículas inorgánicas no es algo sencillo y la técnica MEAM se encontraba patentada, se desechó la idea. En el año 2010, científicos de la Universidad de Shenzhen revivieron la idea aplicando el proceso MEAM-HP para imprimir piezas empleando feedstock de PIM como materia prima [43]. De esta forma, en el año 2018, aparecieron en el mercado las primeras impresoras de MEAM-HP. En la actualidad, a escala industrial se pueden encontrar las impresoras ATLASTM y BAAM, en donde se emplean pellets como materia prima, siendo posible imprimir piezas de hasta 127 x 127 x 182 cm y 610 x 229 x 183 cm respectivamente [44-46]. A menor escala destacan las impresoras de las empresas Destock Metals, Markforged y AIM3D GmbH. La empresa Destock Metals ofrece un sistema de impresión en donde se emplea la materia prima en forma de barritas. En este caso, el ecosistema se compone del equipo de impresión, el baño para realizar el debinding y el horno de sinterizado; en total la solución requiere de una inversión de alrededor de 180.000 € y permite fabricar piezas de hasta 30,5 x 20,5 x 20,5 cm. Al mismo tiempo, la empresa Markforged ofrece una solución muy parecida. Sin embargo, en lugar de emplear barritas como materia prima, usa filamento de 1,75 mm de diámetro. La solución requiere de una inversión de alrededor de 160.000 € y permite imprimir piezas de hasta 32 x 27 x 20 cm [4]. Por otro lado, las impresoras de las empresas Pollen AM [47] y AIM3D GmbH [48] emplean pellets como materia prima y pueden imprimir piezas de hasta 30 Ø x 30 cm y 26 x 26 x 26 cm respectivamente. Además de estas impresoras, existen empresas como BASF, Emery o Virtual Foundry que están desarrollando filamentos poliméricos altamente cargados con partículas inorgánicas que pueden ser empleados en las impresoras de FFF (fabricación por filamento fundido) convencionales. Por último, recientemente han aparecido en el mercado unos cabezales que se pueden instalar en las máquinas domésticas de FFF y que permiten emplear pellets poliméricos cargados con carga inorgánica como materia prima. Ejemplos de estos cabezales son V4 Pellet Extruder [49] y Direct3D [50]. En la **Figura 2.11** se presenta uno de estos cabezales instalado en una impresora 3D doméstica.

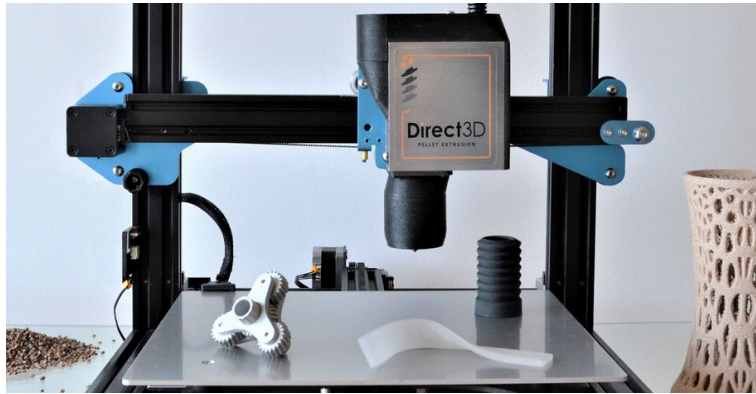


Figura 2.11. Cabezal Direct3D instalado en una impresora 3D de uso doméstico [50].

La consultora industrial AMPower realizó en el año 2022 un reporte en donde se presenta el índice de madurez actual de las tecnologías de fabricación aditiva metálica, **Figura 2.12**. En este reporte, la técnica MEAM-HP es nombrada como *Metal Filament ME* cuando la materia prima se encuentra en forma de filamento y *Metal Pellet ME* cuando la materia prima se encuentra en forma de pellets. Según AMPower, la MEAM-HP en donde se emplea filamento como materia prima se está comenzado a emplear en la industria, por otro lado, la MEAM-HP en donde se emplean pellets como materia prima se encuentra en la fase previa a la industrialización pudiendo alcanzarla en un tiempo de 2 a 5 años [51].

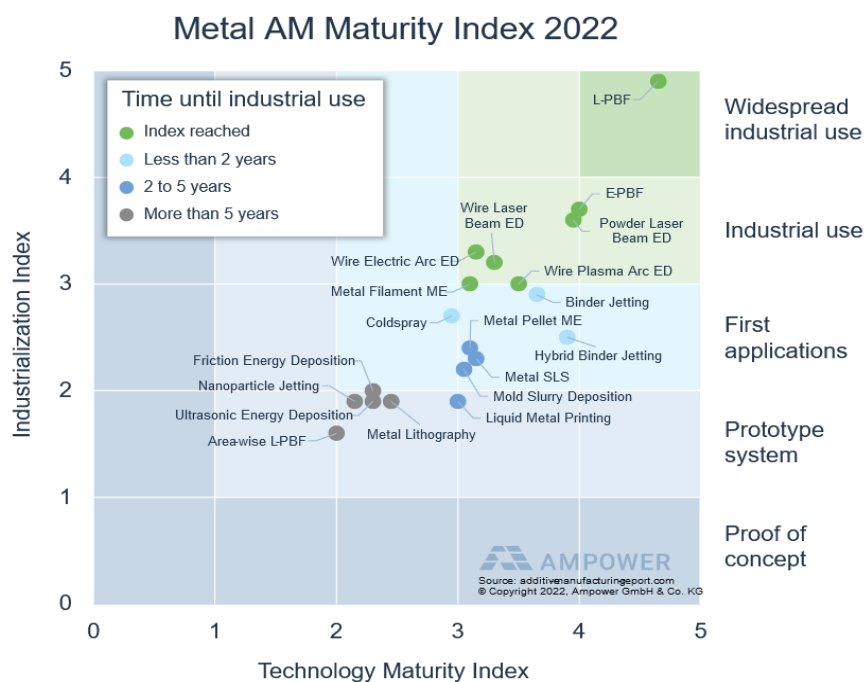


Figura 2.12. Índices de industrialización y de madurez tecnológica de las tecnologías de fabricación aditiva metálica. En este gráfico, la MEAM-HP recibe el nombre de *Metal Filament ME* cuando la materia prima se encuentra en forma de filamento y *Metal Pellet ME* cuando se encuentra en forma de pellets [51].

En otro reporte realizado en el año 2020 por SmarTech Analysis, se espera que, en la próxima década, la MEAM-HP llegue a ocupar el 43 % de la participación de mercado de todos los productos fabricados empleando manufactura aditiva metálica (**Figura 2.13**) [52]. En el reporte la MEAM-HP recibe el nombre de *Bound Metal Printing* (BMP).

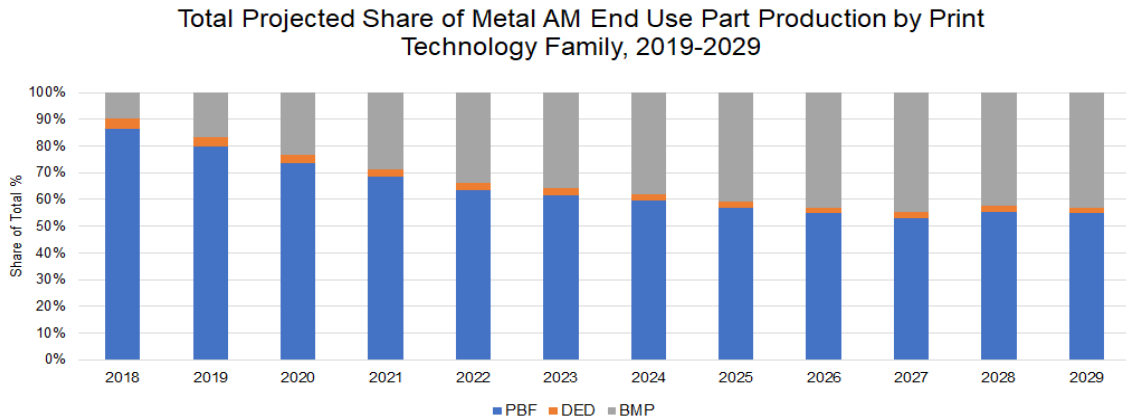


Figura 2.13. Participación de mercado proyectada entre los años 2018 y 2029 para las principales tecnologías de fabricación aditiva metálica. La MEAM-HP recibe en esta gráfica el nombre de *Bound Metal Printing* (BMP) [52]. (Fuente: SmarTech Analysis).

2.4.4 MEAM-HP vs PIM

La MEAM-HP es una técnica muy atractiva para la producción de forma rentable de piezas metálicas y cerámicas, en particular para las empresas que trabajan con PIM puesto que ya disponen del conocimiento y el equipamiento requerido para realizar la eliminación del aglutinante y sinterización tras la fabricación de la pieza en verde. No obstante, esto no implica que la PIM y la MEAM-HP sean recíprocamente excluyentes, sino que, más bien, son complementarias. En cuanto a la capacidad de producción, la PIM es una técnica mucho más rápida que la MEAM-HP; la obtención de las piezas en verde suele tardar segundos en el caso de la PIM mientras que, para la MEAM-HP, se suele tardar horas o incluso días en el caso de piezas grandes con geometrías muy complejas. Debido a los costes de producción de los moldes, la PIM es una técnica que es viable económicamente únicamente cuando se fabrican elevados volúmenes de piezas (> 30.000 piezas por año) [21]. Por otro lado, la MEAM-HP está pensada para ser empleada en la fabricación de series pequeñas de piezas (por ejemplo, prototipado) o

piezas con geometrías que no son posibles de conseguir mediante un molde. Modificar el diseño de un componente en el contexto de la manufactura aditiva es tan simple como actualizar un archivo de ordenador y no se requieren modificaciones en los moldes y herramientas, como resultado, el coste por pieza ya no depende del volumen de producción. Por lo tanto, el coste total de fabricación de las tecnologías de manufactura aditiva es relativamente independiente de la complejidad del diseño y más bien solo está relacionado con el consumo de energía de la máquina y el coste de la materia prima y la mano de obra. Esta es la causa de que, a medida que aumenta el volumen de producción, las curvas de costes presenten una línea plana para las piezas obtenidas mediante MEAM-HP y una pendiente decreciente para las piezas obtenidas mediante PIM (**Figura 2.14**) [53].

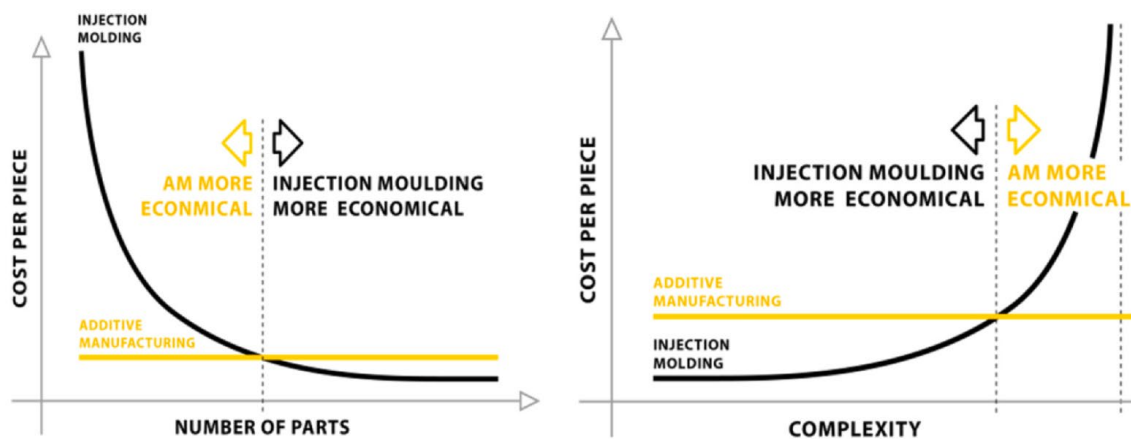


Figura 2.14. Gráficos del coste por pieza de la técnica PIM vs MEAM-HP [53].

2.4.5 Componentes de la materia prima empleada en la MEAM-HP

2.4.5.1 Aglutinante

En la tecnología MEAM-HP, el correcto diseño del aglutinante es indispensable para obtener una pieza con las características deseadas (**Figura 2.15**). El aglutinante tiene la función de aportar la fluidez necesaria a la materia prima durante el proceso de extrusión y de preservar la integridad estructural de la pieza durante la manipulación y el proceso de debinding y sinterizado [19].

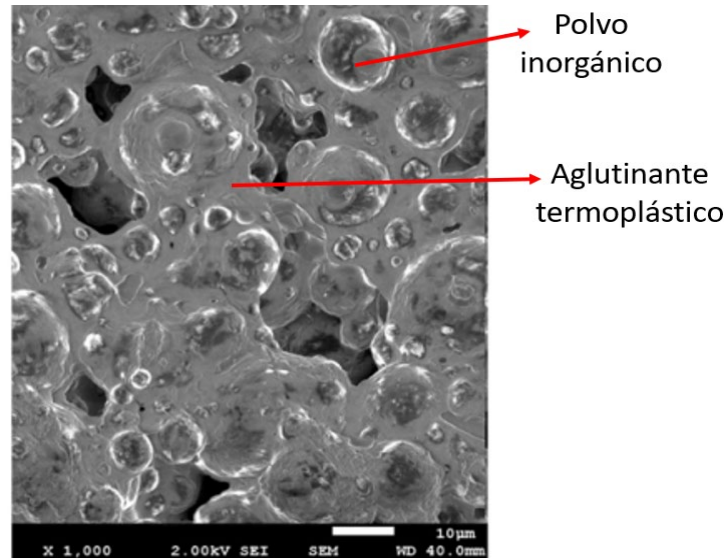


Figura 2.15. Imagen de microscopio electrónico de barrido de una pieza en verde impresa mediante MEAM-HP en donde se pueden observar las partículas inorgánicas esféricas recubiertas por el aglutinante [20].

El aglutinante es un elemento temporal de la materia prima que debe de ser removido durante el posprocesado de la pieza en verde [54]. Una incorrecta eliminación del aglutinante puede dar lugar a defectos tanto dimensionales como microestructurales en la pieza final, con la consiguiente reducción de sus propiedades mecánicas [19]. Por lo tanto, el aglutinante se debe de poder remover de forma sencilla, rápida, limpia y sin que la pieza sufra defectos durante este proceso (además de considerar las inquietudes medioambientales y económicas). Esto añade imposiciones adicionales al aglutinante haciendo que, idealmente, presente las siguientes características [55]:

- (a) Presentar una baja temperatura de fusión y rápida solidificación.
- (b) Presentar una buena fluidez con una baja viscosidad en estado fundido ($\leq 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), sin que esta cambie durante el proceso de conformado. Además de presentar una resistencia mecánica a temperatura ambiente superior a 4 MPa.
- (c) Ser pasivo químicamente y presentar afinidad con las partículas inorgánicas pudiendo humedecerlas con un ángulo de contacto bajo (inferior a 5°).
- (d) Ha de ser asequible económicamente.

- (e) Poder ser removido de forma sencilla y, preferiblemente, no generar residuos que puedan contaminar el medioambiente. Tras descomponerse, sus subproductos no deben de ser ni tóxicos ni corrosivos.

Todo y que en los últimos años se ha desarrollado un enorme abanico de aglutinantes para PIM, hasta el momento no se ha hallado una composición de aglutinante que cumpla con todas las características previamente enumeradas. Por lo tanto, puesto que el desarrollo de un aglutinante con las características deseadas requiere de una gran inversión de tiempo y dinero, los fabricantes de materia prima para PIM y MEAM-HP no suelen especificar la composición de los aglutinantes que emplean para evitar que los competidores desarrollen aglutinantes similares [5].

Generalmente, los aglutinantes están formados por un componente principal (normalmente una cera) y un componente secundario (normalmente un termoplástico de elevada masa molecular, como el polietileno, PE, o el polipropileno, PP). El componente principal tiene la función de humedecer las partículas inorgánicas y de aportar la fluidez requerida durante el proceso de conformado. Por otro lado, el componente secundario (o *backbone*) se encarga de aportar la rigidez y resistencia necesaria a la pieza en verde para que esta mantenga su geometría durante la manipulación y el proceso de debinding y sinterizado. Normalmente el aglutinante también contiene tensioactivos. Los tensioactivos actúan como lubricante durante la extrusión del material generando una delgada capa en la superficie de las partículas inorgánicas lo que reduce la fricción entre las partículas inorgánicas a la vez que aumenta su compatibilidad con el aglutinante permitiendo obtener una materia prima más homogénea [56]. Los tensioactivos generalmente constituyen menos del 2 % en volumen de la materia prima, ya que valores superiores a estos pueden producir grietas y burbujas durante la eliminación térmica del aglutinante. El tensioactivo más comúnmente empleado es el ácido esteárico (SA) [57].

En los últimos años, puesto que para eliminar las ceras (componente principal del aglutinante) se han de emplear disolventes costosos y tóxicos para el ser humano, las ceras se están sustituyendo por polímeros degradables [13]. Estos polímeros son más sostenibles con el medioambiente y biocompatibles, además, algunos se pueden disolver en agua (como el polietilenglicol, PEG) lo que simplifica enormemente su eliminación permitiendo reducir los costes de producción a la vez que se reduce la contaminación medioambiental. En la **Tabla 2.1** se muestran ejemplos de aglutinantes comerciales basados en PEG [58].

Tabla 2.1. Algunas composiciones de aglutinantes para PIM y MEAM-HP basados en PEG [58].

Componentes del aglutinante (% en peso)	Carga inorgánica
87 PEG, 11 PMMA, 2 ácido esteárico	Ti6Al4V
65 PEG, 30 PP, 5 ácido esteárico	Esteatita
60 PEG, 35 PE, 5 ácido esteárico	Acero inoxidable 316 L
PEG/PVB 2:1 + ácido esteárico	Alúmina, Ti6Al4V

2.4.5.2 Carga inorgánica

La viscosidad de la materia prima no solo vendrá determinada por el aglutinante, sino que también dependerá de las propiedades de la carga inorgánica, como su distribución del tamaño de partícula o su geometría [59-60]. Normalmente, la carga inorgánica empleada presenta una geometría esférica con una distribución del tamaño de partícula multimodal con un D90 (tamaño donde el 90 % de la distribución tiene un tamaño de partícula más pequeño y el 10 % uno más grande) inferior a 20 μm (**Figura 2.16**). Estas características permiten obtener un mayor empaquetamiento de las partículas inorgánicas a la vez que se mejora el flujo de material extruido haciendo posible la obtención de piezas con una mayor homogeneidad microestructural, densidad y propiedades mecánicas además de menores distorsiones tras el sinterizado [14][37][55].

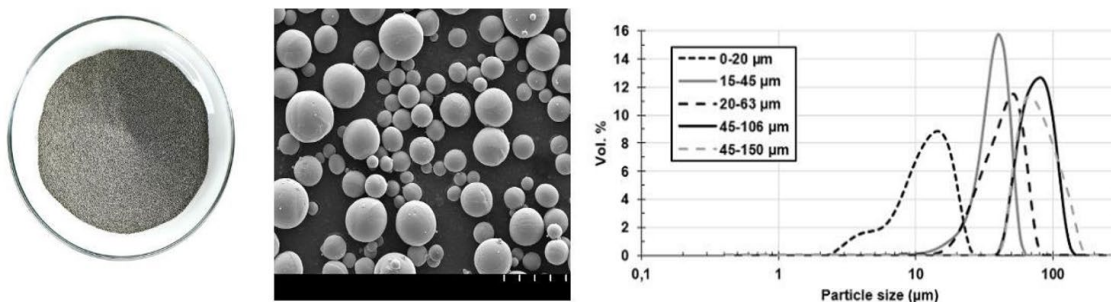


Figura 2.16. Geometría y distribuciones del tamaño de partícula comúnmente utilizadas en técnicas que emplean polvos inorgánicos como materia prima. En el caso de la PIM y de la MEAM-HP se emplean polvos con tamaños de partícula < 20 μm . (Fuente: catálogo de polvos de la empresa Made-in-china).

En los últimos años, se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios para seleccionar el volumen óptimo de aglutinante y de carga inorgánica en la materia prima [61-63]. Todos los estudios concuerdan en que los volúmenes de carga inorgánica que dan los mejores resultados se encuentran entre el 50 y el 65 %. Valores superiores al 65 % incrementan excesivamente la viscosidad de la materia prima en estado fundido lo que dificulta su extrusión reduciendo el índice de rendimiento. Al mismo tiempo, aunque una menor cantidad de carga inorgánica reduce la viscosidad facilitando la extrusión y la adhesión capa-capá, contenidos por debajo del 50 % reducen en exceso la capacidad de sinterización de la pieza y, por lo tanto, reducen su densidad final y sus propiedades mecánicas. En estos estudios también se concluye que mayores cantidades de carga inorgánica y reparticiones más homogéneas en la materia prima facilitan la eliminación del aglutinante y el sinterizado, haciendo posible la obtención de piezas más densas con menores contracciones [5][64].

2.4.6 Eliminación del aglutinante

La eliminación del aglutinante normalmente se realiza en dos etapas, una primera etapa en donde se eliminan, mediante un solvente, uno o varios de los componentes principales del aglutinante seguido de una segunda etapa en donde se eliminan térmicamente el resto de componentes secundarios. Se desea aclarar que existen otros métodos más avanzados de eliminación de aglutinante, como el catalítico o el asistido por plasma, los cuales permiten eliminar más rápidamente el aglutinante, pero necesitan de productos químicos muy peligrosos y/o elevadas inversiones de capital por lo que cada vez son menos usados [13].

Al eliminar los componentes principales del aglutinante mediante solvente se generarán canales interconectados (**Figura 2.17**) los cuales facilitarán la extracción de los componentes restantes del aglutinante durante la eliminación térmica minimizando la aparición de defectos [19]. Tras la eliminación de los componentes principales del aglutinante la pieza suele presentar una porosidad cercana al 17 % [65].

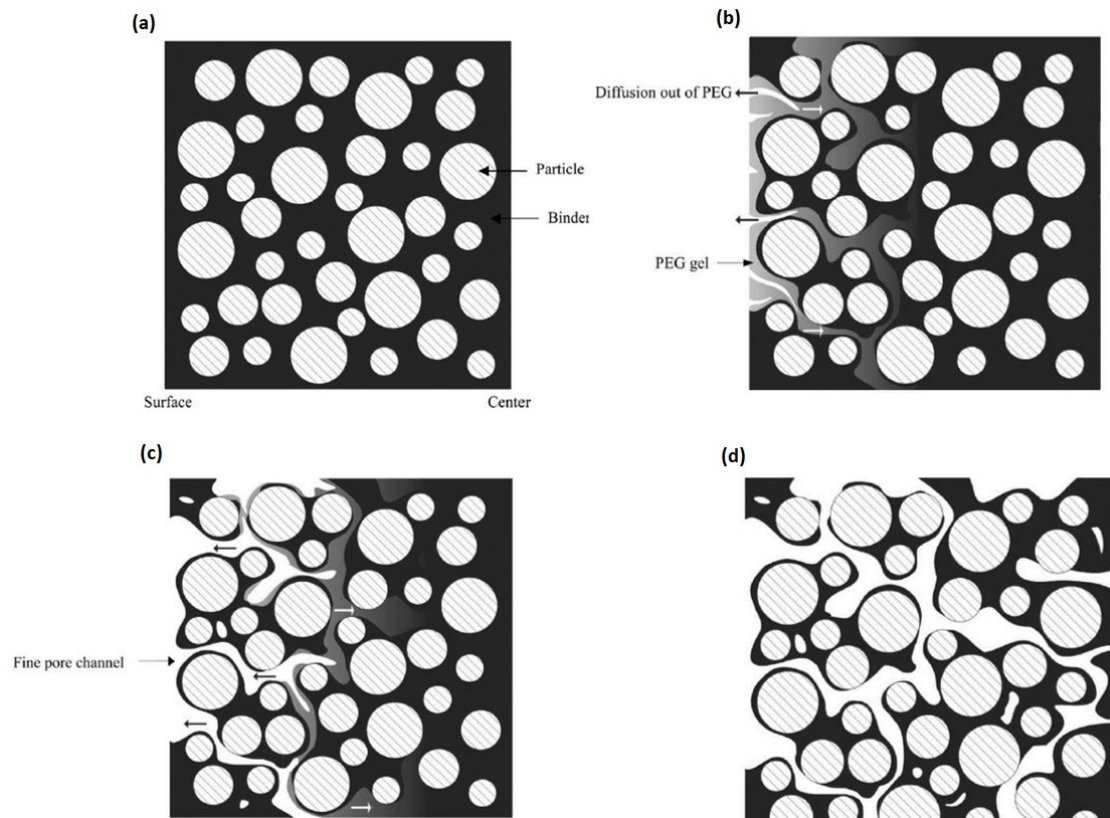


Figura 2.17. Esquema del mecanismo de eliminación, mediante solvente, del componente principal del aglutinante de una pieza en verde (en este caso PEG disuelto en agua). (a) pieza en verde, (b) inicio de la eliminación del PEG por disolución, (c) etapa intermedia y (d) pieza tras la eliminación del PEG (pieza en marrón) [66].

Factores como: el tiempo, la temperatura, la composición de la materia prima o el espesor de la pieza determinarán la velocidad de eliminación del componente principal del aglutinante (**Figura 2.18a**) [5]. Se recomienda no imprimir piezas con espesores superiores 10 mm ya que para valores superiores se incrementa en exceso el tiempo de eliminación del aglutinante [20]. Una incorrecta eliminación del componente principal del aglutinante puede dar lugar a defectos en la pieza final, como la aparición de burbujas o “hinchamiento” (**Figura 2.18b**) [67-68]. El hinchamiento es provocado cuando, al no eliminar por completo el componente principal del aglutinante, la porosidad de la pieza no es lo suficientemente elevada como para facilitar la salida de los gases generados al eliminar térmicamente los componentes restantes del aglutinante por lo que estos gases quedan atrapados en el interior produciendo el hinchamiento de la pieza [69].

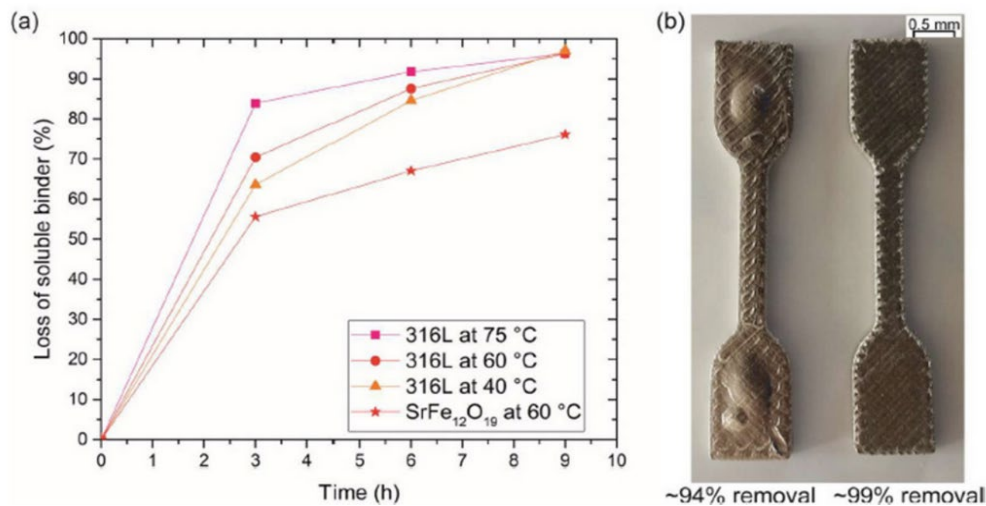


Figura 2.18. (a) Velocidad de eliminación mediante solvente a diferentes temperaturas del componente principal del aglutinante de una pieza en verde fabricada con una materia prima cargada con diferentes polvos inorgánicos (SrFe₁₂O₁₉ y acero 316L); (b) Probetas de acero 17-4PH tras un sinterizado con diferentes cantidades de componente principal del aglutinante removido en donde se observa el hinchamiento de la probeta izquierda debido a una incorrecta eliminación del componente principal del aglutinante [68].

La eliminación térmica de los componentes secundarios del aglutinante (*thermal debinding*) normalmente se suele realizar entre 200 - 600 °C y, en general, se lleva a cabo en el mismo ciclo térmico que el sinterizado (**Figura 2.19**) [14][70].

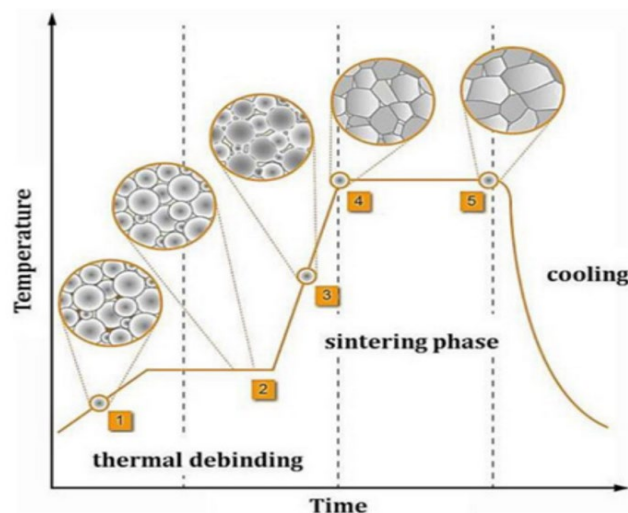


Figura 2.19. Ciclo térmico típicamente empleado para realizar la eliminación térmica de los componentes secundarios del aglutinante y el sinterizado de piezas impresas mediante MEAM-HP [70].

2.4.7 Sinterización

Tras la eliminación del aglutinante, la sinterización es el último paso para obtener la pieza final. Previamente a la sinterización, la pieza presenta una elevada porosidad (**Figura 2.20a**). Al incrementar la temperatura hasta la mitad o dos tercios de la temperatura de fusión de las partículas inorgánicas, se genera difusión atómica y modificaciones químicas en la superficie de las partículas produciéndose la formación de cuellos entre las partículas (**Figura 2.20b**). A medida que se alcanza la temperatura final de sinterización, estos cuellos crecen reduciendo la porosidad de la pieza (los poros se vuelven más pequeños y esféricos) (**Figura 2.20c**). En la fase final de la sinterización, se produce un aislamiento de los poros y la pieza alcanza valores de densidad próximos al 100 % de la densidad teórica [14][19]. En esta fase final también tiene lugar el crecimiento del tamaño de grano, lo que, en general, empeora las propiedades mecánicas [67]. Esto hace que, para obtener los resultados esperados, sea de extrema importancia tener un control preciso del ciclo térmico de sinterizado.

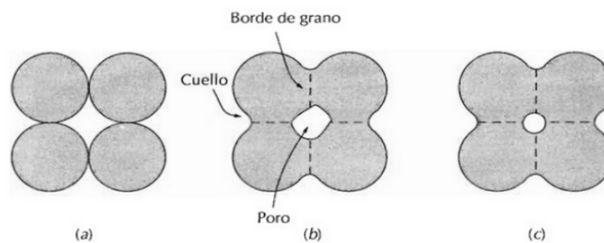


Figura 2.20. Esquema del proceso de sinterización [20].

Las piezas obtenidas mediante MEAM-HP siempre sufren contracciones tras el sinterizado provocadas por la densificación de la pieza (**Figura 2.21**) [5]. La contracción que sufrirá la pieza dependerá de la composición de la materia prima [64].

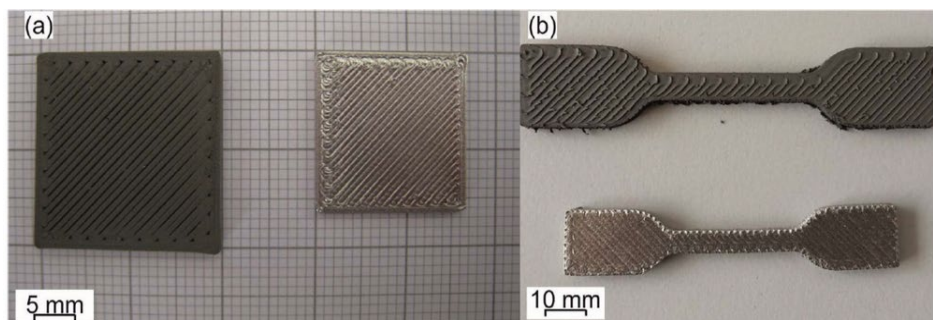


Figura 2.21. Piezas fabricadas mediante MEAM-HP, antes y después del sinterizado, en donde se puede observar la contracción sufrida por las piezas tras el sinterizado. (a) 316L y (b) acero 17-4PH [68][71].

2.4.8 Características de las piezas obtenidas mediante MEAM-HP

Las piezas obtenidas mediante MEAM-HP suelen presentar densidades de entre el 95,8 y el 98,7 % mientras que las piezas obtenidas por PIM suelen presentar densidades entre el 98,3 y el 99,2 % (**Figura 2.22**) [16][72]. La PIM permite obtener mayores densidades ya que en esta técnica se aplica una contrapresión al inyectar el material en el molde; en el caso de la MEAM-HP, al depositar los filamentos capa a capa, no se aplica contrapresión por lo que el material se encuentra menos compactado. Las piezas fabricadas mediante MEAM-HP se pueden someter a un hot isostatic pressing (HIP) para alcanzar densidades relativas de hasta el 99,9 % [7][18-19].



Figura 2.22. Microestructura y porosidad de piezas sinterizadas fabricadas mediante MEAM-HP (metal FDM en esta imagen) y MIM (moldeo por inyección de polvos metálicos) [72].

Por la naturaleza de la técnica, el control dimensional de las piezas fabricadas por MEAM-HP es complejo y se requiere de un control muy preciso de los parámetros de impresión y de las propiedades reológicas de la materia prima. Actualmente varios estudios han logrado fabricar piezas con variaciones dimensionales entre el 0,26 y el 1,28 % [38][56]. La rugosidad (R_a) de las piezas fabricadas mediante MEAM-HP se encuentra entre 16,1 y 3,2 μm por lo que suelen requerir de un posprocesado de mejora de acabado para competir con la PIM (**Figura 2.23**) [72].

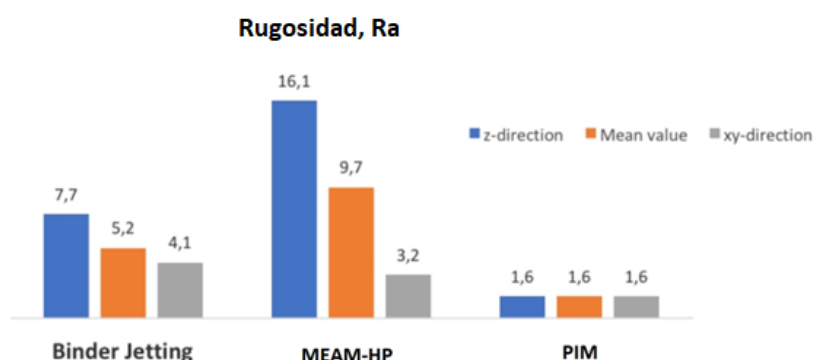


Figura 2.23. Rugosidad superficial de piezas fabricadas mediante diferentes técnicas [72].

Los estudios realizados sobre la contracción tras el sinterizado que sufren las piezas obtenidas mediante MEAM-HP concuerdan en que esta contracción es muy similar a la que presentan las piezas obtenidas mediante PIM (entre el 15 y el 20 %, aunque estos valores pueden variar considerablemente en función de las propiedades de la carga inorgánica y del aglutinante empleado). Además, tanto en la PIM como en la MEAM-HP, la contracción suele ser anisotrópica [16][38][73-75]. En la MEAM-HP, la contracción anisotrópica se produce por la orientación preferencial que adquieren las cadenas poliméricas del aglutinante al extruir los filamentos durante el proceso de impresión además de por los pequeños vacíos que se pueden generar entre los filamentos depositados [74]. Debido a la incapacidad de evitar por completo la contracción anisotrópica, esta se ha de tener en consideración a la hora de elaborar el diseño 3D y seleccionar los parámetros de impresión [5].

Microestructuralmente, las piezas obtenidas mediante MEAM-HP son comparables a las de las piezas fabricadas mediante PIM [42]. Pero, mientras que las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas mediante PIM se consideran relativamente isotrópicas, las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas mediante MEAM-HP son anisotrópicas debido al método de fabricación capa por capa que se emplea en esta técnica (por lo que las propiedades mecánicas variarán en función de la dirección de aplicación del esfuerzo) [76-77]. En la **Figura 2.24** se esquematiza esta problemática.

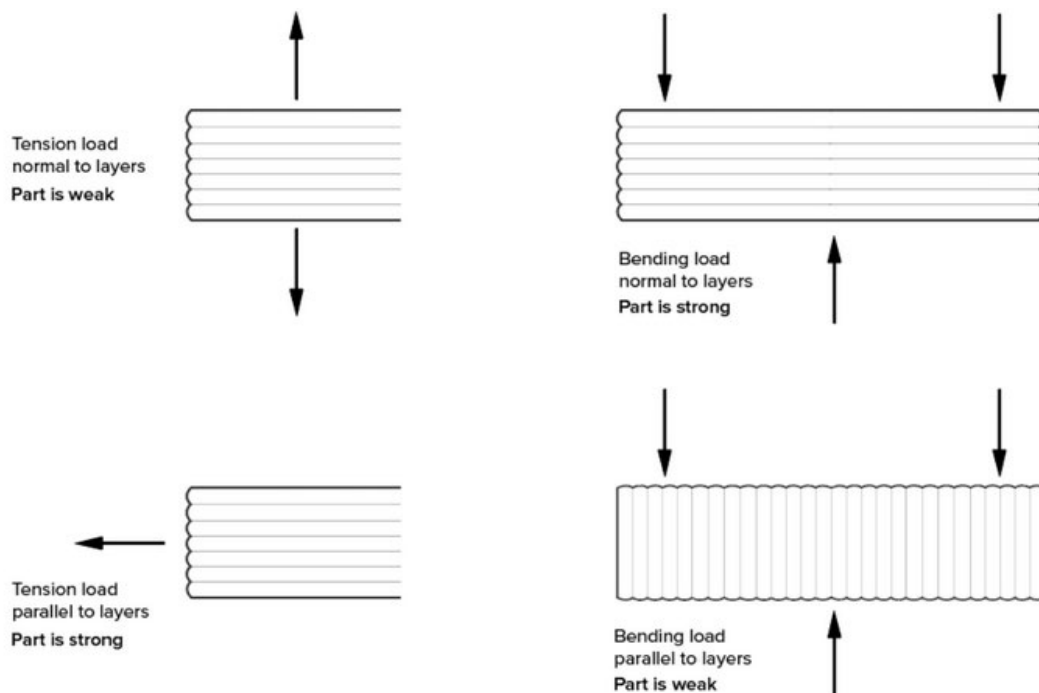


Figura 2.24. Esquema de la variación de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante MEAM-HP en función de la dirección de aplicación de la tensión [78].

Spiller et al. [77] emplearon la MEAM-HP para fabricar dos probetas de tracción geoméricamente iguales, pero con diferentes orientaciones de capa. Las probetas que se ensayaron paralelamente a las capas mostraron una tensión a la rotura entre un 0,8 y un 4,3 % inferior a la que muestran estas probetas fabricadas mediante PIM. Por otro lado, las probetas ensayadas perpendicularmente a las capas mostraron una tensión de rotura un 13.4% inferior a la de las probetas ensayadas paralelamente. La menor resistencia mecánica al ensayar las probetas perpendicularmente a las capas se debe a que, como los filamentos extruidos son redondeados, se generan pequeños valles (*notches*) entre capa y capa los cuales se comportan como concentradores de tensiones fomentando la generación de grietas (**Figura 2.25**).

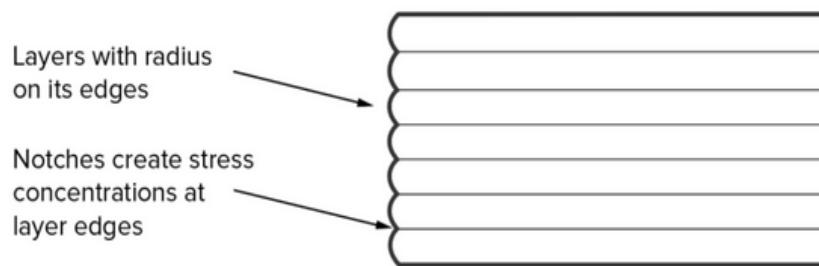


Figura 2.25. Valles (*notches*) generados al depositar los filamentos capa sobre capa [78].

3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA EMPLEADA EN EL PROYECTO VIVALDI

En este apartado se va a explicar la metodología que han empleado las empresas que colaboran en el proyecto VIVALDI para fabricar la materia prima que ha sido utilizada en este trabajo (**Figura 3.1**). Se quiere aclarar que mucha de esta información se encuentra en desarrollo y patentada por lo que la información que se ha podido encontrar/compartir es escasa.

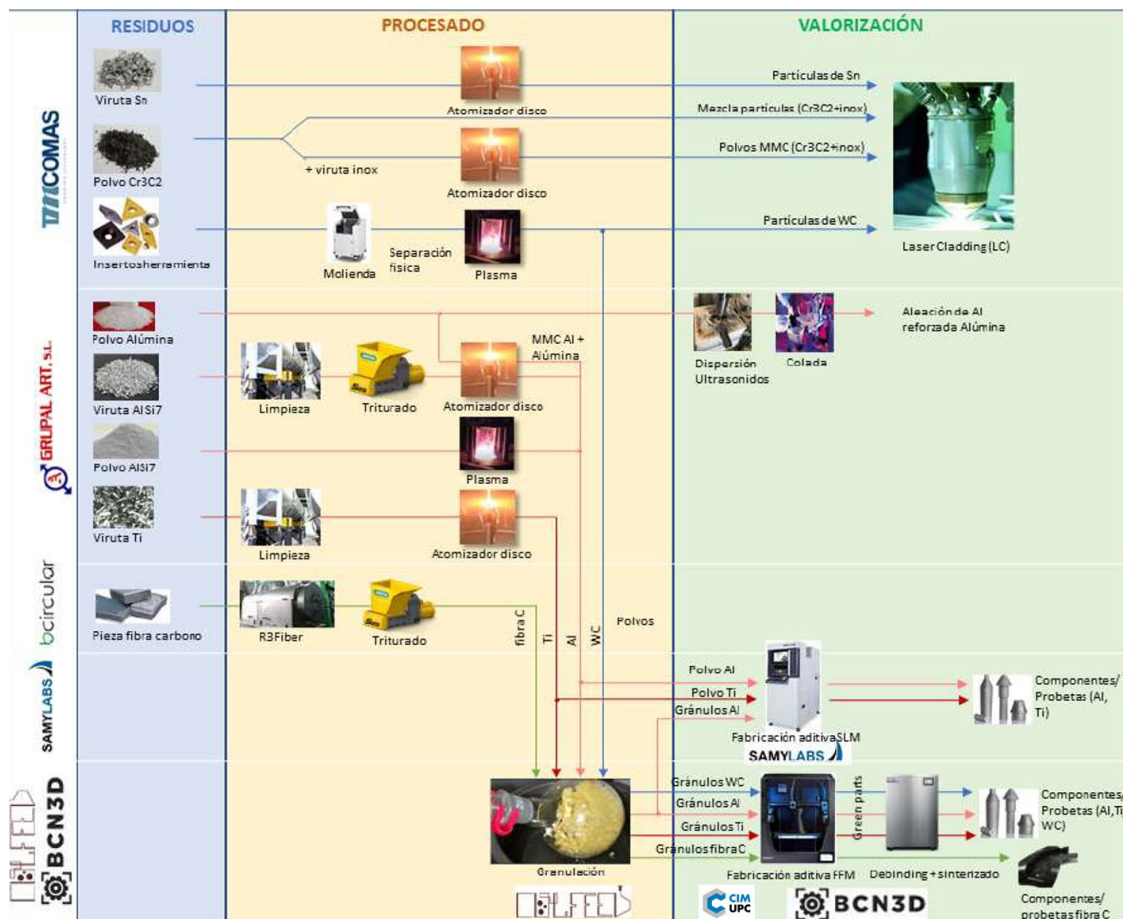


Figura 3.1. Vías de obtención de la materia prima empleada en el proyecto VIVALDI [4].

En la MEAM-HP es común emplear la materia prima en forma de filamento enrollado en una bobina y alimentado de forma continua al extrusor (**Figura 3.2b**). El hecho de emplear la materia prima en forma de filamento trae muchas desventajas pues estos filamentos son difíciles de fabricar y procesar; debido a la fragilidad de estos filamentos, se pueden producir roturas

durante su alimentación al extrusor, lo que obliga a detener la impresión y sustituir el filamento. Para evitar esta problemática, algunos fabricantes emplean barras en vez de filamentos (**Figura 3.2a**). Las barras son más gruesas que el filamento y, al no estar enrolladas en una bobina, no es necesario que presenten cierta flexibilidad para poder ser alimentadas al extrusor lo que disminuye enormemente la probabilidad de que se rompan durante la alimentación. A pesar de esto, estas barras no se pueden alimentar de forma continua al extrusor, por lo que cuando se termina una de las barras se ha de parar la impresión para sustituirla por una nueva lo que puede generar defectos en la pieza y aumentar considerablemente los tiempos de impresión. Es por esto que, en los últimos años, la industria está comenzando a emplear pellets en lugar de filamentos (**Figura 3.2c**). Trabajar con la materia prima en forma de pellets trae varias ventajas. Los pellets se pueden fabricar y procesar de forma más sencilla (además de que se pueden emplear pellets de PIM, lo que reduce drásticamente su coste de adquisición) y permiten obtener aumentos considerables de la tasa de alimentación disminuyendo considerablemente el tiempo de impresión [4-5][79-80].

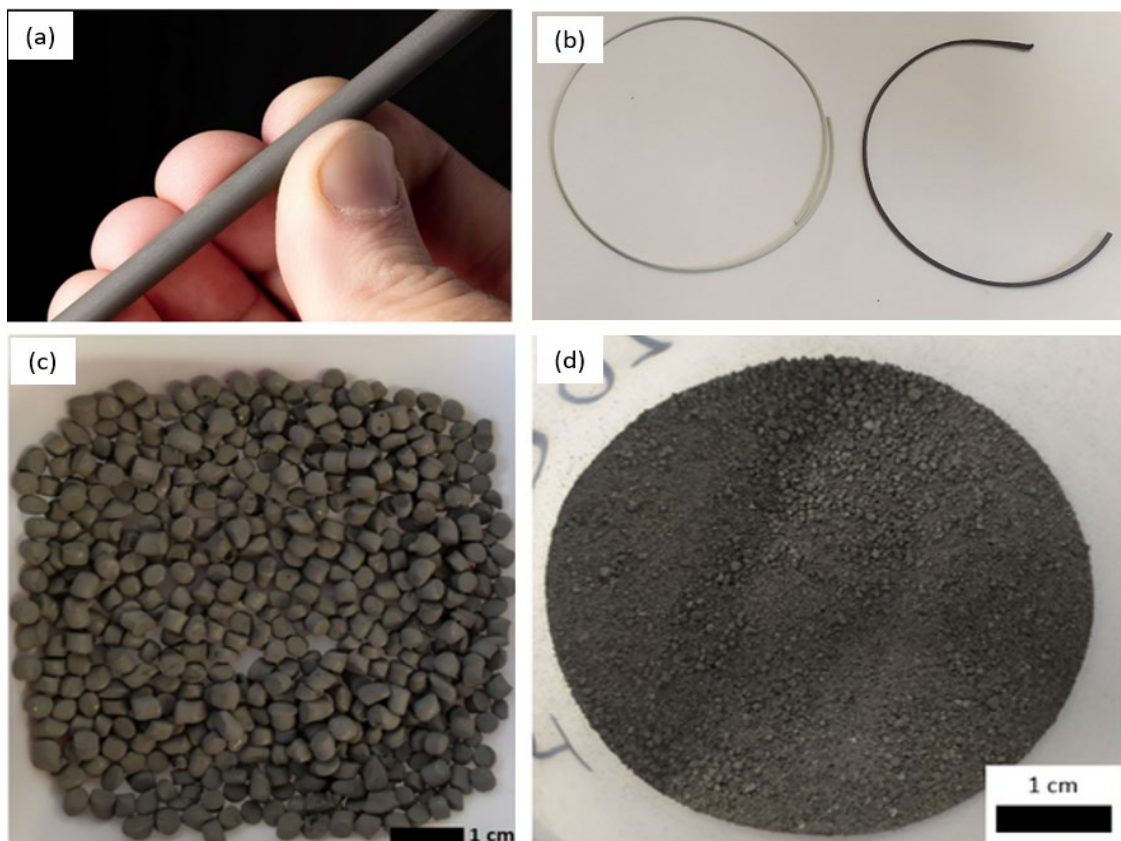


Figura 3.2. Diferentes formas en las que se puede emplear la materia prima empleada en la MEAM-HP. (a) barras, (b) filamento, (c) pellets y (d) gránulos. Fuentes: (a) [4] y (b-d) elaboración propia.

En la actualidad, la gran mayoría de materia prima empleada para la MEAM-HP presenta unas composiciones del aglutinante muy similares a las empleadas en la técnica PIM. En estas composiciones se emplean polímeros de cadena corta para humedecer las partículas de polvo inorgánicas y aportar la fluidez necesaria durante el proceso de conformado. A elevadas temperaturas, estos polímeros de cadena corta se degradan excesivamente rápido, por lo que, si no se eliminan mediante un debinding previo al debinding térmico y sinterizado, se producen defectos en la pieza (por ejemplo, hinchamiento). Este debinding previo es un proceso lento (normalmente tiempos superiores a 7 horas) y que en la mayoría de casos requiere el empleo de disolventes tóxicos. Para evitar esta problemática, desde el proyecto VIVALDI se propone el uso de materia prima en forma de gránulos obtenidos mediante mezclado coloidal (**Figura 3.2d**). El mezclado coloidal permite emplear composiciones de aglutinante que no requieren de una cantidad tan elevada de polímeros de cadena corta por lo que no es necesario realizar un debinding previo al debinding térmico y sinterizado. Al mismo tiempo, el mezclado coloidal permite obtener una distribución mucho más homogénea de las partículas inorgánicas en la matriz polimérica (por lo que las contracciones sufridas durante el sinterizado serán más isotrópicas y la integridad estructural de la pieza se verá menos afectada). Por último, comparado con los pellets, el tamaño más pequeño de los gránulos podría promover una alimentación más constante de material en el extrusor lo que favorecería el control del flujo de material extruido [4-5].

3.1 Obtención del polvo inorgánico

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 2.4.5.2**, el polvo inorgánico que contiene la materia prima empleada en la MEAM-HP precisa de unas características especiales. Las empresas que colaboran en el proyecto VIVALDI obtienen este polvo mediante la revalorización de residuos provenientes de industrias que generan viruta, restos pulverizados o de proyección, prestando mayor atención, a la recuperación de ciertas composiciones altamente tecnológicas como carburo de wolframio o titanio. Para la revalorización de estos materiales se emplea la tecnología de atomización centrífuga y la tecnología de plasma por microondas. Ambas tecnologías permiten procesar materiales recuperados en forma de viruta o partícula, y convertirlos en polvos que cumplan con los requerimientos exigidos en la MEAM-HP [4][14].

3.1.1 Atomización centrífuga

La atomización centrífuga consiste en impactar un chorro de metal líquido sobre un disco rotatorio enfriado de forma que se cree un spray de gotas que se solidifican formando las partículas de polvo (**Figura 3.3**). Con esta técnica se obtienen partículas esféricas con tamaños de partícula que oscilan entre los 30 μm y los 250 μm [4][81-82].

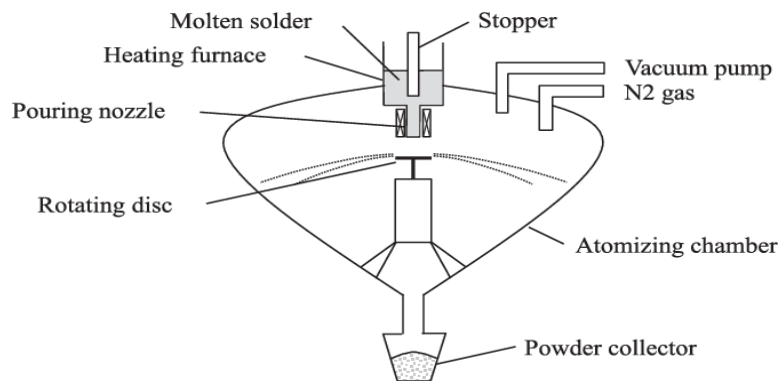


Figura 3.3. Esquema del proceso de atomización centrífuga [81].

La atomización centrífuga ofrece importantes ventajas si se compara con los procesos tradicionales de atomización por gas o por agua. Entre estas ventajas se encuentra la obtención de partículas más esféricas que las obtenidas por gas y sin satélites (partículas más pequeñas adheridas), con lo que el polvo presenta una excelente fluidez. Además, es un proceso altamente eficiente desde el punto de vista energético. Las principales limitaciones de la atomización centrífuga son la elevada velocidad requerida del disco atomizador y las altas temperaturas que debe soportar, lo que históricamente ha restringido su uso a metales de bajo punto de fusión [81-82]. Eurecat, uno de los colaboradores del proyecto VIVALDI, ha desarrollado un diseño para refrigerar el disco atomizador que permite ampliar el rango de aplicación de la tecnología a materiales de alto punto de fusión como, por ejemplo, el titanio. En el proceso de atomización se emplea, como material de partida, la aleación con las especificaciones y composición final deseadas. Esto implica que, para la revalorización de los residuos, se deban realizar anteriormente varias etapas de limpieza, ajuste de la composición y moldeo en un formato adecuado para alimentar el equipo de atomización. La innovación tecnológica llevada a cabo en el proyecto VIVALDI ha permitido reducir el número de estas etapas, de forma que únicamente sean necesarias una o dos etapas, lo que ha permitido mejorar los tiempos de procesado y la eficiencia energética. Por ejemplo, en el caso de los restos de WC estos se funden directamente

y se fabrica el polvo en una única operación, mientras que en las virutas de titanio se realiza una etapa de limpieza previa [4].

3.1.2 Atomización de plasma generado por microondas

La atomización de plasma se suele emplear para producir polvos de metales reactivos de alta pureza (como, por ejemplo, WC). El plasma, considerado el cuarto estado de la materia, es un gas fuertemente ionizado, lo que significa que coexisten iones y electrones libres. Los electrones se desprenden de las moléculas que componen el gas y mediante efecto cascada y aporte de energía mantienen el plasma activo. Gracias a esta elevada reactividad, todo material introducido en él sufre el bombardeo de iones y electrones lo que provoca su fusión. En la atomización de plasma, la materia prima (en forma de barras, alambres, gránulos, o materiales líquidos y gases) es llevada a través del sistema de alimentación hacia la cámara de plasma, en donde las temperaturas pueden superar los 4700 °C. En esta cámara la materia prima se funde y vaporiza al entrar en contacto con el plasma convirtiéndose en gotas superfinas que solidifican en forma de partículas de polvo esféricas de tamaños muy pequeños (**Figura 3.4**). El proceso se lleva a cabo en una atmósfera protectora (normalmente con gases de elevada conductividad térmica como el helio) para aumentar la velocidad de solidificación de las gotas y evitar la oxidación de las partículas de polvo [4][83].

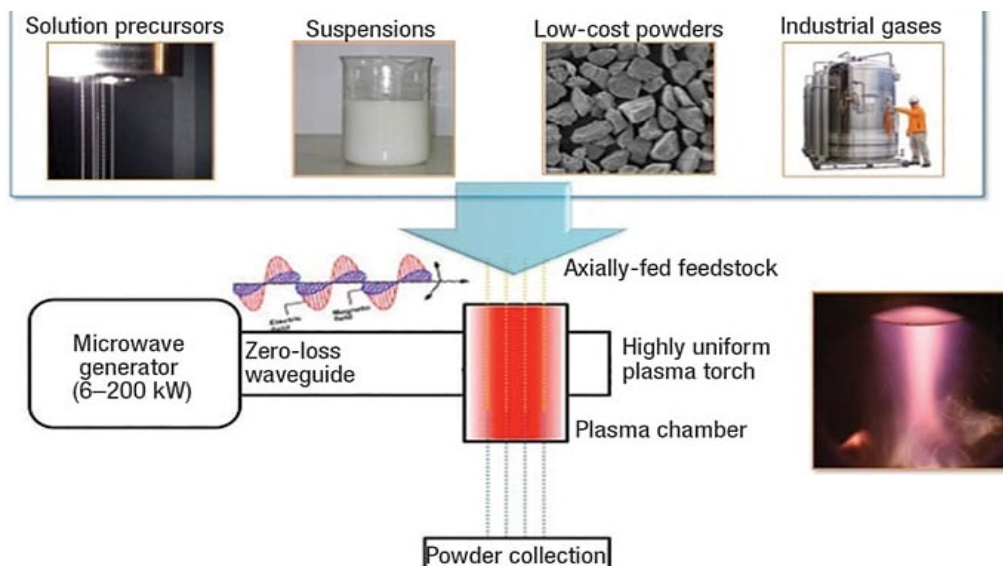


Figura 3.4. Esquema del proceso de obtención de polvo mediante la atomización de plasma generado por microondas [83].

Actualmente los sistemas de plasma tienen un elevado coste de adquisición y mantenimiento, que debe ser amortizado con la producción de grandes cantidades de material. En el proyecto VIVALDI se propone la utilización de generadores de microondas los cuales permiten reducir el consumo energético, facilitar la generación de plasma y reducir el coste de los consumibles empleados. Todo esto permite disminuir el coste de producción de los polvos [4].

3.2 Obtención de los gránulos mediante mezclado coloidal

Colfeed es la empresa encargada de fabricar los gránulos empleados en este estudio como materia prima para la MEAM-HP. Para obtener los gránulos, el polvo inorgánico se han de embeber en una matriz termoplástica polimérica. El método comúnmente empleado para realizar esta mezcla se conoce como mezclado térmico convencional o mezclado por fusión. En este método, el polímero se funde y se mezcla mecánicamente con las partículas inorgánicas de polvo. Para garantizar la homogeneidad de la mezcla final, la mezcla obtenida se suele triturar para volver a ser mezclada por fusión una segunda vez, repitiendo este proceso tantas veces como sea necesario. El mezclado por fusión presenta inconvenientes, pues al tener que realizar varios procesos de triturado y mezclado se puede provocar la degradación de alguno de los componentes y/o la mezcla final. Otro problema de este método es la elevada viscosidad del polímero fundido ($> 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) lo que limita la cantidad de carga inorgánica que se puede añadir a la matriz polimérica y su dispersión; cargas inorgánicas bajas heterogéneamente dispersas en la matriz polimérica provocarán contracciones anisotrópicas muy elevadas comprometiendo la precisión dimensional de la pieza impresa [84-87].

Es por esta razón que, en los últimos cinco años, se han desarrollado diferentes estrategias de mezclado para desplazar el mezclado por fusión. Entre estas estrategias se encuentra la empleada por Colfeed, la cual consiste en obtener la materia prima mediante un mezclado coloidal. En el mezclado coloidal, las partículas inorgánicas se estabilizan químicamente y se dispersan coloidalmente en una disolución polimérica (mezcla en suspensión). La baja viscosidad de la mezcla en suspensión ($< 0,1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) fomenta la dispersión y asegura la homogeneidad de la carga inorgánica en la matriz polimérica. Colfeed no ha querido revelar información sobre el proceso y los materiales específicos empleados para realizar este tipo de mezclas, pero, tras consultar varias de sus patentes y artículos publicados se cree que el proceso podría consistir en las siguientes etapas [4][86-87] (**Figura 3.5**):

1. Preparación de una suspensión dispersa y estable de partículas inorgánicas por adsorción en superficie de un estabilizante/dispersante (preferiblemente un polielectrolito). Este estabilizante/dispersante mejorará la afinidad entre la matriz polimérica y las partículas inorgánicas a la vez que limitará la reactividad superficial de las partículas inorgánicas, evitando su predisposición a la oxidación y la posterior disolución de oxígeno en su red cristalina durante el tratamiento térmico de sinterización. Cualquier disolvente puede ser utilizado para preparar la suspensión, incluso agua. Las partículas inorgánicas se dispersan en la suspensión por medios mecánicos o sónicos.
2. Eliminación del disolvente de la suspensión obtenida en la etapa (1). La eliminación de este disolvente se realiza mediante centrifugación o filtración.
3. Redispersión del producto obtenido en la etapa (2) con una disolución polimérica que comprende al menos un polímero o un copolímero termoplástico. Esta disolución polimérica suele comprender, además, un plastificante, un colorante o un antiespumante. Cabe señalar que las partículas inorgánicas se redispersan por medios mecánicos o sónicos en la suspensión.
4. Secado del producto obtenido en la etapa (3) en ausencia de temperatura para evitar el deterioro de la matriz polimérica termoestable. El secado se lleva a cabo bajo presión reducida en un rotavapor o mediante congelación-sublimación.
5. Tras el secado se obtienen una especie de escamas las cuales se muelen con un molino de bolas hasta obtener los gránulos con el tamaño deseado.

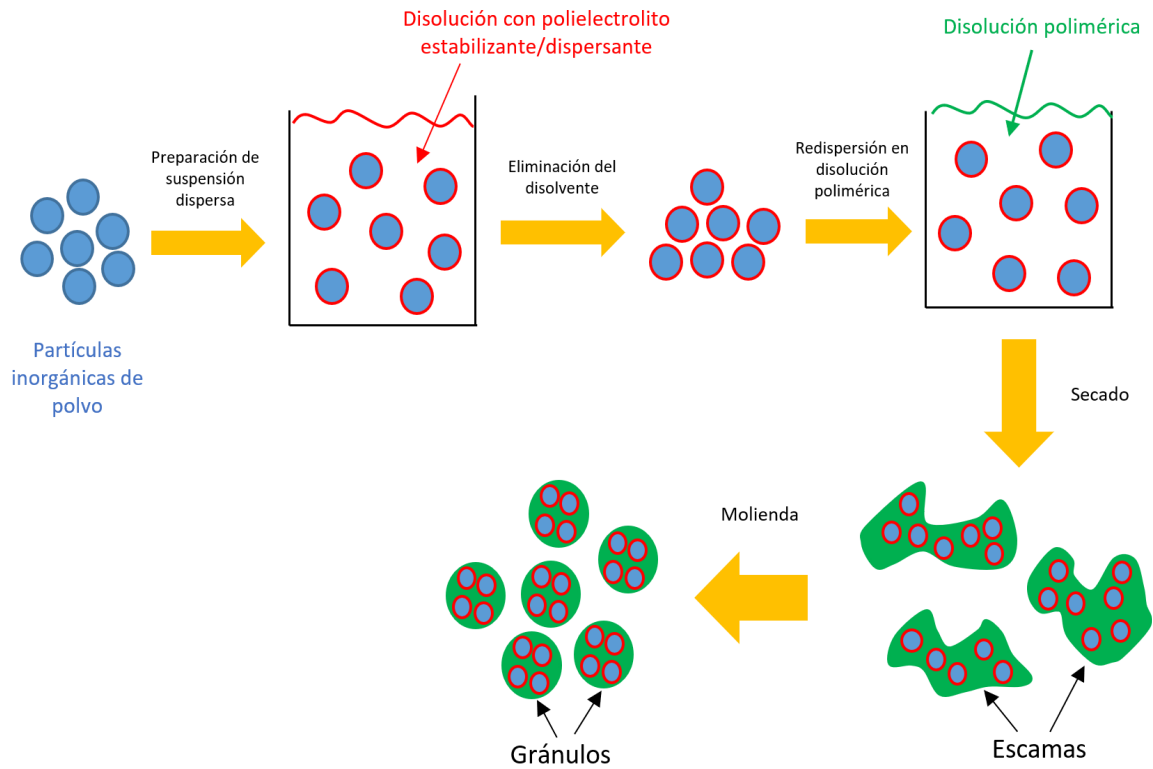


Figura 3.5. Posibles etapas del método de mezclado coloidal empleado por Colfeed para la fabricación de los gránulos estudiados en este trabajo. (Fuente: elaboración propia).

4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS GRÁNULOS PARA EL DISEÑO DE UNA TOLVA

En este apartado se van a describir las propiedades características de los gránulos que se han considerado a la hora de diseñar un sistema de impresión 3D capaz de emplear estos gránulos como materia prima, poniendo especial énfasis en el diseño de una tolva.

4.1 Flujo de los gránulos

El control del flujo de material extruido es de vital importancia para obtener una pieza con los resultados deseados. Para asegurar el control de flujo de material extruido es indispensable garantizar que la materia prima se está alimentando de forma uniforme y constante al cabezal extrusor. En los cabezales de impresión 3D convencionales se emplea como materia prima un filamento que es empujado hacia la boquilla mediante unos engranajes movidos por un motor (**Figura 4.1a**), este sencillo mecanismo permite garantizar de forma sencilla y eficaz un flujo constante de material al extrusor. En este trabajo, al usar gránulos como materia prima, se ha de emplear una tolva para poder alimentar al cabezal extrusor de husillo (**Figura 4.1b**). Lamentablemente, el flujo de los gránulos en las tolvas no siempre es uniforme. Esto normalmente resulta en variaciones del flujo de material extruido y composición del material, lo que se traduce en pesadillas operacionales [88].

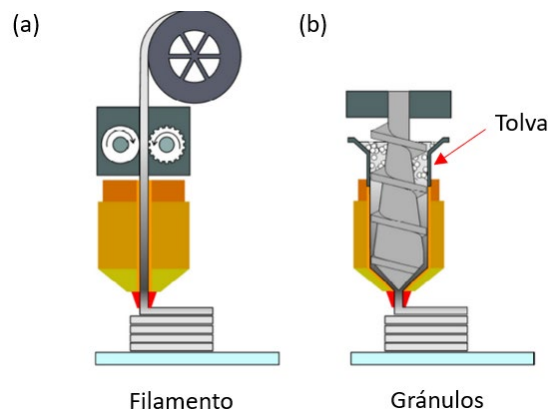


Figura 4.1. Esquema de (a) cabezal extrusor de filamentos convencional y (b) cabezal extrusor de husillo empleado en este trabajo. (Fuente: Adaptado de [20]).

Existen dos patrones comunes de flujo que pueden desarrollarse en una tolva: flujo de embudo y flujo en masa. En el flujo de embudo se forma un canal de flujo activo sobre la salida con material que no fluye en la periferia, lo que provoca que se quede material en el interior de la tolva (**Figura 4.2a**). El flujo de embudo puede hacer que los gránulos se apelmacen, proporcionar una secuencia de flujo de "primero en entrar, último en salir" y, en el caso que haya partículas de diferente naturaleza, se puede producir su segregación. En el flujo en masa todo el material se mueve de forma uniforme, siendo lo primero que entra lo primero que sale (**Figura 4.2b**). Cuando una tolva presenta un flujo en masa se elimina el material estancado y se reduce la segregación que puedan sufrir las partículas de los gránulos, brindando una descarga constante con un flujo uniforme y bien controlado. Los requisitos para lograr un flujo en masa incluyen dimensionar la salida de la tolva con un tamaño lo suficientemente grande como para evitar que se produzcan arqueamientos del material (el material se acumula en forma de arco en la salida de la tolva lo que puede producir atascos, **Figura 4.2c**) y asegurarse de que las paredes de la tolva sean lo suficientemente suaves y empujadas para promover el flujo en las paredes evitando la aparición de agujeros de rata o *rat-holes* (el material se acumula en las paredes sin fluir, **Figura 4.2d**) [88-89].

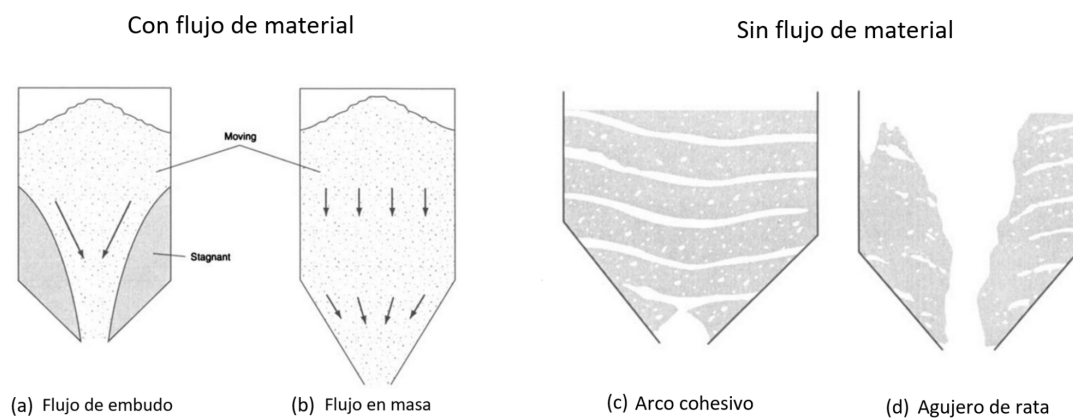


Figura 4.2. Ejemplos de situaciones con flujo de material (flujo de embudo y flujo en masa) y sin flujo de material (arco cohesivo y agujero de rata). (Fuente: adaptado de [88]).

Las características del flujo de los gránulos a través de la tolva dependerán de una gran variedad de variables como: la fricción entre los gránulos, su geometría y distribución del tamaño de

partícula, su composición, su densidad aparente, su gravedad específica, factores ambientales... En general, las tasas de flujo reducidas se observan en gránulos que exhiben una o más de las siguientes características: tamaños de partícula pequeños (inferiores a 44 μm), baja gravedad específica y densidad aparente, elevado coeficiente de fricción entre partículas, elevada superficie específica, mezclas complejas de diferentes materiales y elevado contenido de humedad [88-89].

4.2 Densidad aparente de los gránulos

La densidad aparente es una de las propiedades fundamentales de los gránulos. La densidad aparente define el volumen real ocupado por una masa de material granulado (g/cm^3), lo que afecta directamente al flujo de material y a los parámetros de procesamiento; en general, gránulos con mayores densidades aparentes presentaran una mayor tasa de flujo. La densidad aparente de un material en forma de gránulos será, en la gran mayoría de los casos, inferior a su densidad másica pues siempre existirán espacios vacíos entre los gránulos lo que disminuirá la densidad del material [88-89].

La densidad aparente de los gránulos dependerá de su disposición, densidad másica, geometría, distribución del tamaño de partícula, área superficial y rugosidad. La densidad aparente, generalmente (1) disminuye al disminuir el tamaño de las partículas de los gránulos; cuanto más pequeñas son las partículas, mayor es la superficie específica de los gránulos, este fenómeno aumenta la fricción entre las partículas disminuyendo la densidad aparente. (2) disminuye a medida que la forma de las partículas se vuelve menos esférica y más irregular debido tanto al aumento del área superficial de fricción como a la menor uniformidad de las partículas de polvo durante el empaquetado. (3) disminuye al aumentar la rugosidad de la superficie y (4) se controla con frecuencia mezclando varios tamaños de partículas (una forma efectiva de aumentar la densidad aparente de un polvo es llenar los espacios entre las partículas con partículas más pequeñas) [88].

4.3 El test de Carney funnel

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 4.1**, se requiere un buen comportamiento del flujo de polvo en la tolva para tener una alta productividad y consistencia en la producción de piezas. El método de flujo de Hall se usa ampliamente en la industria pulvimetalúrgica para la caracterización de polvos (fluidez y densidad aparente) y fue establecido como estándar por la Federación de Industrias de Polvo de Metal (MPIF) en 1945 (también es un estándar internacional, concretamente el ISO 4490:2018) [90].

El principio del método del flujo de Hall es muy simple: una cantidad determinada de polvo fluye a través de un embudo (*Hall funnel*, **Figura 4.3a**) y el tiempo requerido para que fluya todo el polvo se registra como flujo de hall (s/g). Al pasar por el embudo, el polvo cae sobre un recipiente con un volumen conocido (este recipiente recibe el nombre de copa de densidad, **Figura 4.3c-d**), cuando el recipiente se encuentra completamente lleno con el polvo, se mide el peso del polvo y se divide por el volumen del recipiente obteniendo de esta forma la densidad aparente del polvo (g/cm^3). Una gran ventaja del método es su simplicidad y el bajo costo del equipo de prueba requerido. El embudo de Hall tiene una geometría estandarizada con ángulo de cono de 60° y orificio de salida de $\varnothing 2,5 \text{ mm}$ (**Figura 4.3a**). Un embudo con un orificio de salida de $\varnothing 5 \text{ mm}$, el embudo Carney (**Figura 4.3b**), también existe en el estándar MPIF 28 y ASTM B964-16 para medir la densidad aparente y el flujo de los polvos que no fluyen libremente a través del embudo Hall (por ejemplo, cuando se tienen polvos muy aglomerados o mezclas de polvos con alto contenido de lubricante, grafito y/o otros aditivos de partículas finas) [88][90].

Puesto que los gránulos estudiados en este trabajo presentan carga metálica/cerámica junto con unos tamaños de partícula lo suficientemente pequeños como para poder pasar por el embudo, se cree que su fluidez y densidad aparente se podrían caracterizar mediante un método similar al propuesto por los embudos de Hall y de Carney.

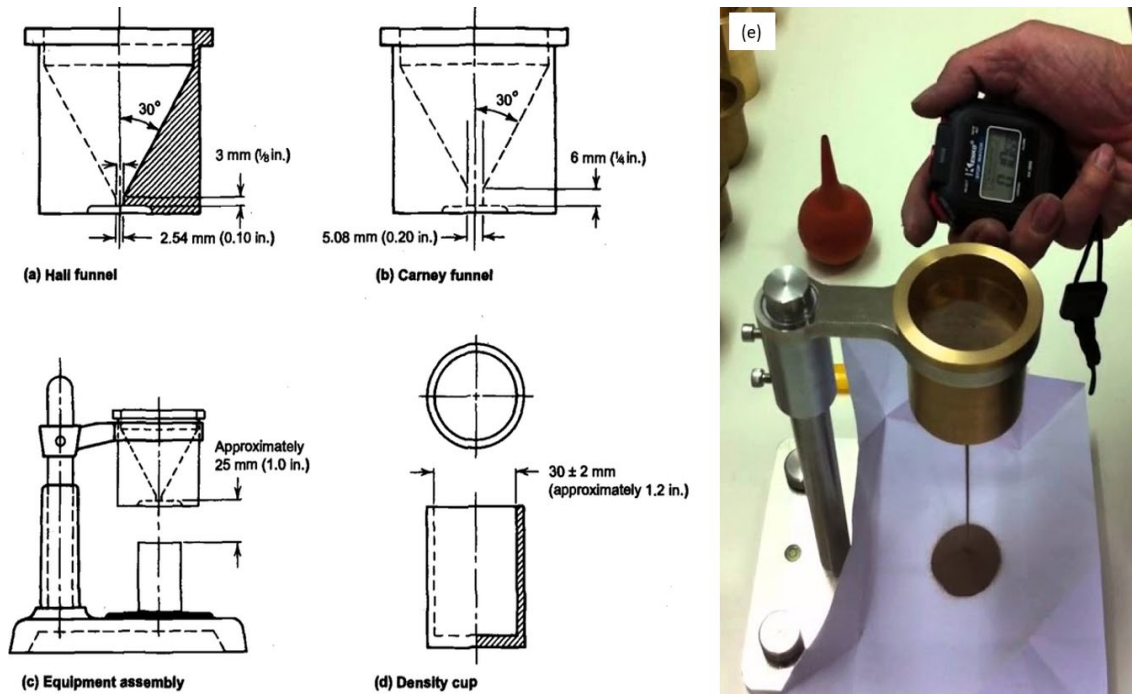


Figura 4.3. Dimensiones de (a) embudo de Hall y (b) embudo de Carney dictadas por la norma ISO 4490:2018 y ASTM B964-16 respectivamente. En esta misma figura también se esquematiza (c) el montaje del ensayo y (d) las dimensiones recomendadas del recipiente empleado para medir la densidad aparente (copa de densidad); el montaje y las dimensiones recomendadas de la copa de densidad son iguales tanto para el embudo de Hall como para el embudo de Carney. (e) ejemplo del procedimiento para realizar un ensayo de Carney [88].

4.4 Selección de los parámetros de diseño de la tolva

El trabajo fundamental en el desarrollo de la teoría del flujo de polvos comenzó en serio a principios de la década de 1950, cuando Andrew Jenike aplicó un concepto de mecánica continua de sólidos para desarrollar un enfoque teórico lógico para comprender y administrar el flujo de sólidos. Jenike desarrolló métodos de prueba, equipos y técnicas de diseño y realizó experimentos para confirmar y refinar su innovador análisis. Jenike encontró que el ángulo de la tolva requerido para permitir el flujo a lo largo de las paredes depende de la fricción entre el polvo y las paredes, la fricción entre las partículas de polvo y la geometría de la tolva. Por otro lado, el tamaño de salida requerido depende de la fuerza cohesiva y la densidad aparente del polvo. Gran parte de estos parámetros se obtienen mediante ensayos de cizalla (**Figura 4.4**) y complejas ecuaciones [89].

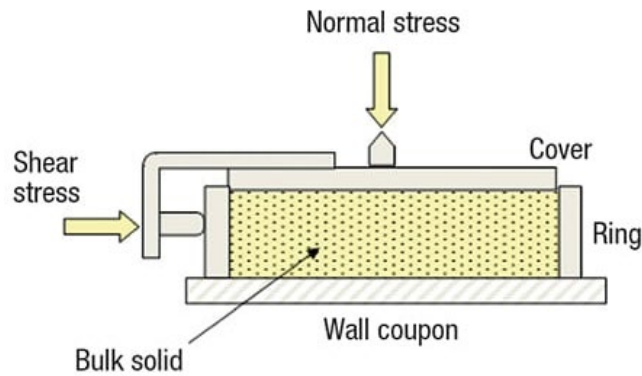


Figura 4.4. Ejemplo de uno de los ensayos de cizalla empleados para el estudio del flujo de sólidos. En este ensayo se somete al polvo a una fuerza normal a la vez que se aplica una fuerza de cizalla. Al medir la fuerza requerida para deslizar la muestra de polvo a lo largo de la pared, se puede determinar el ángulo de fricción del polvo con la pared [91].

En la actualidad, la metodología diseñada por Jenike es el estándar para el estudio del flujo de sólidos en forma de polvos. En lo que concierne a este trabajo, dado a que no se dispone del equipamiento necesario, y el diseño de una tolva mediante la metodología actual propuesta por Jenike supondría un estudio demasiado extenso que se encuentra más allá del alcance de este trabajo, se ha decidido diseñar la tolva empleando un procedimiento más empírico siguiendo las indicaciones generales propuestas por la literatura especializada en el diseño de tolvas.

De las diversas propiedades físicas de los polvos, el ángulo de reposo es la más sencilla de obtener. El ángulo de reposo está relacionado con la fricción entre partículas y la fluidez del material sin cohesión. El ángulo de reposo se estima formando un montón con la muestra de polvo a estudiar, dejando caer el polvo desde una altura determinada sin ejercer presión sobre el montón, el ángulo que forma sobre el piso el montón representa el ángulo de reposo (**Figura 4.5**) [88][92].

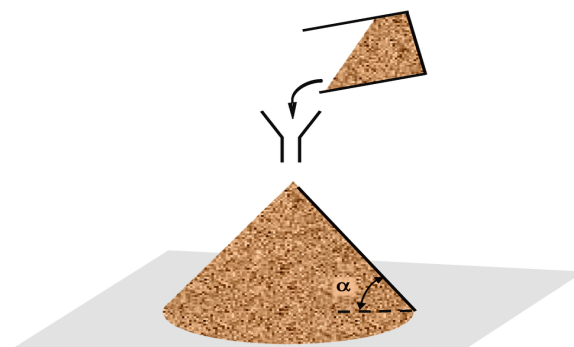


Figura 4.5. Esquema del ensayo del ángulo de reposo (α) [92].

En la **Figura 4.6** se presenta un esquema de las dimensiones características de una tolva piramidal. Según un estudio realizado por Choque [92], la inclinación de la caída de tolva (β) que permite que el material fluya en este tipo de tolvas es aproximadamente 15 grados más que el ángulo de reposo (α). Por lo tanto, es posible aproximar la inclinación necesaria en la tolva para que el material fluya empleando la **Ecuación 4.1**.

$$\beta = \alpha + 15^{\circ} \quad (\text{Ec.4.1})$$

En donde β es la inclinación necesaria en la tolva para que el polvo pueda fluir y α es el ángulo de reposo del polvo.

Para que el material pueda fluir, la literatura recomienda un tamaño mínimo de salida en la tolva (d) de 2,5 veces el tamaño más grande de partícula para polvos con tamaños de partícula aleatorios (distribución del tamaño de partícula ancha) y de 5 veces el tamaño más grande de partícula para polvos con tamaños de partícula similares (distribución del tamaño de partícula estrecha) [93]. Al mismo tiempo, la altura de la tolva (h) tendrá un efecto sobre el tipo de flujo que pueda llegar a presentar el polvo; tolvas con una altura h inferior a la apertura superior (D) tenderán a presentar agujeros de rata, mientras que tolvas con una altura h superior a D tenderán a presentar flujo másico [89].

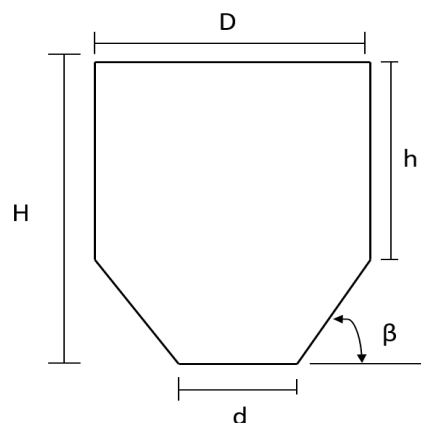


Figura 4.6. Esquema de las dimensiones características de una tolva. (Fuente: elaboración propia).

5. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

En este apartado se van a describir los parámetros de impresión más relevantes a la hora de imprimir una pieza empleando la MEAM-HP (**Figura 5.1**). Estos parámetros determinarán la forma en la que será impresa la pieza y, por lo tanto, su resultado final.

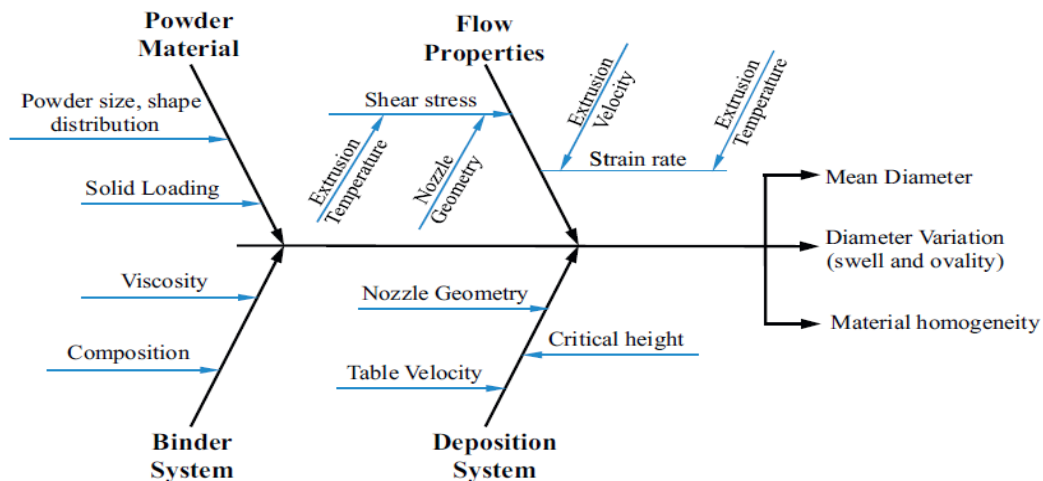


Figura 5.1. Parámetros de procesamiento y de impresión más relevantes al imprimir una pieza mediante MEAM-HP [94].

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 2.2**, los diferentes parámetros de impresión se introducen en un programa laminador, el cual se encarga de cortar el modelo 3D en capas delgadas y crear un archivo G-Code con todas las órdenes que ha de seguir la impresora 3D para imprimir el objeto. Lamentablemente, en la actualidad no existe un programa de laminación pensado para el cabezal extrusor de husillo empleado en este estudio, por lo tanto, se ha empleado el programa laminador PrusaSlicer (diseñado para deposición fundida por filamento, en donde se emplea la materia prima en forma de filamento) adaptando la introducción de los parámetros al cabezal extrusor de husillo.

5.1 El flujo de material extruido

En la MEAM-HP, el flujo (*flow rate*) es el volumen de material que es extruido en un tiempo determinado en función de los parámetros de impresión seleccionados para realizar la impresión de una pieza. Controlar flujo no es una tarea sencilla y pequeñas variaciones pueden

afectar considerablemente a las dimensiones del filamento extruido lo que, a su vez, afectará el resultado final de la pieza produciéndose variaciones dimensionales o huecos [95]. Se considera que un extrusor tiene un buen control del flujo cuando cumple el principio de conservación de la tasa de flujo volumétrico (**Ecuación 5.1**) [96-97].

$$TPV = TFV \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde *TPV* es la tasa de producción volumétrica, o, en otras palabras, el volumen de material que es extruido en un tiempo determinado, y *TFV* es la tasa de flujo volumétrico, o, en otras palabras, el volumen de material que es empujado por el extrusor hacia la boquilla en un tiempo determinado. Ambos valores en mm³/s.

Existen una gran variedad de parámetros que pueden afectar al flujo como: la composición de la materia prima, la temperatura de extrusión o el shear rate aplicado. Todos estos parámetros tienen en común el hecho de alterar la viscosidad del material que está siendo extruido (**Figura 5.2**). En general, una reducción de la viscosidad de la materia prima supone un aumento del flujo; tal y como se puede observar en la **Figura 5.3**, en donde, al aumentar la temperatura de extrusión, se produce una reducción de la viscosidad de la materia prima lo que, a su vez, aumenta el flujo de material extruido. Por lo tanto, el control preciso de la viscosidad del material durante el proceso de impresión es clave para obtener unos buenos resultados [64][94].

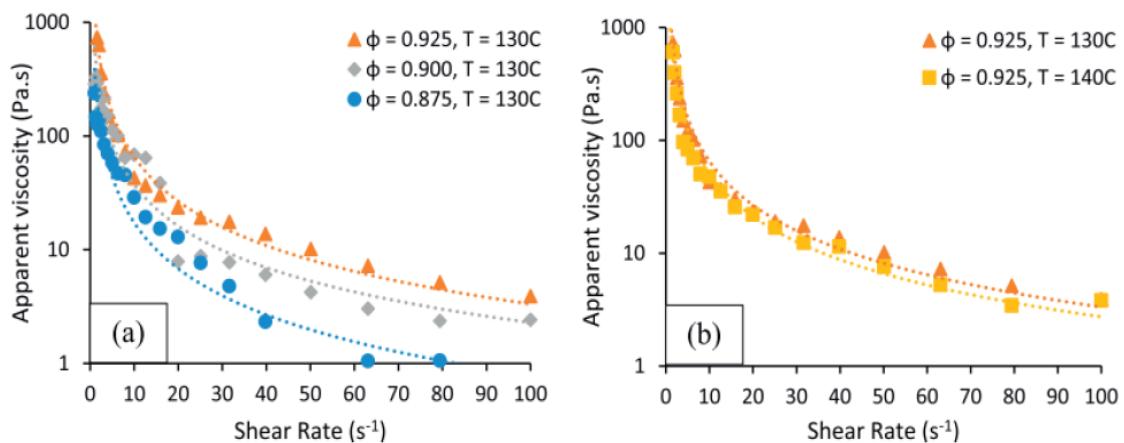


Figura 5.2. Efecto de la cantidad de carga metálica (ϕ), temperatura (T) y el shear rate en la viscosidad aparente de una materia prima para MEAM-HP cargada con partículas de acero inoxidable 316 [94].

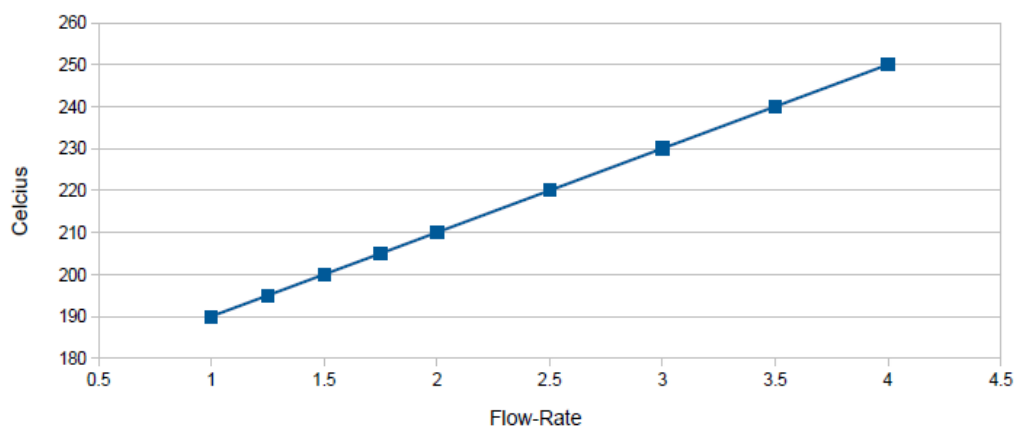


Figura 5.3. Efecto de la temperatura en el flujo (Flow rate) al extruir un material termoplástico (PLA).
(Fuente: gráfico realizado por un usuario del foro 3D Printing Stack Exchange).

5.2 El diámetro de la boquilla

El diámetro de la boquilla instalada en el cabezal afectará a la precisión con la que se podrá imprimir la pieza. Al disminuir el diámetro de la boquilla se disminuye la sección de los filamentos extruidos, por lo que se podrán imprimir piezas con menores tolerancias dimensionales; todo y esto, a mayores reducciones del tamaño de la boquilla, mayor será el tiempo de impresión y la dificultad a la hora de controlar el flujo [96][98]. Según la famosa ecuación de Hagen-Poiseuille (**Ecuación 5.2**), una disminución del diámetro de la boquilla (D_b) aumentará el shear rate ($\dot{\gamma}$) aplicado a la materia prima; la enorme mayoría de polímeros empleados en impresión 3D son pseudoplásticos, por lo que un aumento del shear rate disminuirá su viscosidad. De acuerdo con esta misma ecuación, al reducir el tamaño de la boquilla se reduce considerablemente el caudal volumétrico (Q). Esto fuerza al husillo a girar a mayores revoluciones por segundo para extruir los filamentos con las dimensiones deseadas lo que puede producir atascos e irregularidades en el flujo [94].

$$\dot{\gamma} = \frac{32 \cdot Q}{D_b^3} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Ecuación de Hagen-Poiseuille donde $\dot{\gamma}$ es el shear rate (ratio de deformación de un polímero fundido; con unidades de s^{-1}), Q es el caudal volumétrico (volumen de material que atraviesa una superficie dada en un tiempo determinado; con unidades de mm^3/s) y D_b es el diámetro de la boquilla (mm).

En la MEAM-HP, el hecho de emplear un termoplástico cargado con partículas inorgánicas hace que existan algunas limitaciones en cuanto al tamaño de la boquilla. En general, se recomienda no emplear boquillas con diámetros inferiores a 0,5 mm ya que las partículas inorgánicas se pueden aglomerar en la boquilla produciéndose taponamientos y dificultado el control del flujo. Todo y esto, el tamaño mínimo de la boquilla dependerá de factores como el tamaño de las partículas inorgánicas o su geometría [98].

5.3 Dimensiones del filamento extruido y altura de capa

En la MEAM-HP, los filamentos extruidos se comprimen al ser depositados por lo que no presentan una geometría completamente cilíndrica [94]. La altura a la que se ha de colocar la boquilla para que no se produzca esta compresión recibe el nombre de altura crítica de la boquilla (h_c) (**Figura 5.4**) y se puede calcular mediante la **Ecuación 5.3** [99].

$$h_c = \frac{TFV}{V_{cabezal} \cdot D_b} \quad (\text{Ec.5.3})$$

Donde $V_{Cabezal}$ es la velocidad a la que se mueve el cabezal mientras deposita el filamento medida en mm/s; esta velocidad puede ser seleccionada a través de PrusaSlicer.

En general, se desean imprimir capas con una altura por debajo de la altura crítica (h_c) pues al comprimir los filamentos se aumenta la precisión dimensional de la pieza a la vez que se aumenta la adhesión de los filamentos, lo que disminuye las porosidades y permite obtener mayores densidades y propiedades mecánicas [100].

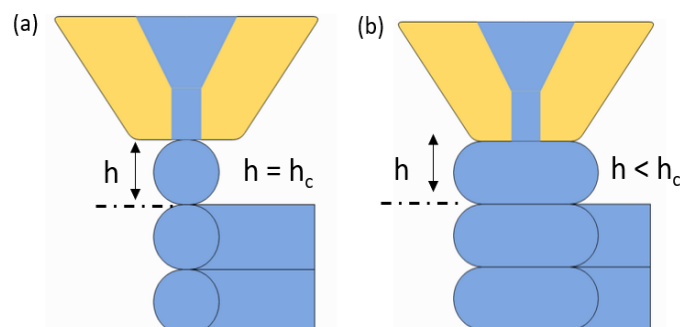


Figura 5.4. Esquema de la geometría que presentan los filamentos depositados con altura de la boquilla (a) igual a la altura crítica ($h=h_c$) y (b) inferior a la altura crítica ($h<h_c$) [101].

PrusaSlicer estima el área de la sección transversal del filamento depositado de la manera esquematizada en la **Figura 5.5**. PrusaSlicer considera el centro del filamento depositado como un rectángulo, mientras que considera los lados como un semicírculo con un diámetro equivalente a la altura de capa. PrusaSlicer permite seleccionar la altura (h) y la anchura (w) del filamento depositado. En general, se extruyen filamentos con anchuras de entre 1 y 1,5 veces el diámetro de la boquilla [98][102].

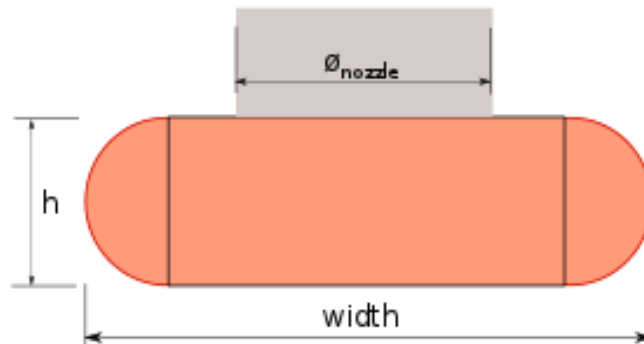


Figura 5.5. Forma que emplea PrusaSlicer para medir las dimensiones de un filamento depositado [102].

PrusaSlicer calcula el área de la sección transversal del filamento depositado mediante la **Ecuación 5.4**, donde $A_{\text{Depositado}}$ es el área de la sección transversal del filamento depositado en mm^2 .

$$A_{\text{Depositado}} = A_{\text{Rectángulo}} + A_{\text{Círculo}} = (w - h) \cdot h + \pi \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

5.4 Velocidad de extrusión

PrusaSlicer calcula la tasa de producción volumétrica (TPV) mediante la **Ecuación 5.5**.

$$TPV = A_{\text{Depositado}} \cdot V_{\text{Cabezal}} = \left((w - h) \cdot h + \pi \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \right) \cdot V_{\text{Cabezal}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Para el cálculo de la tasa de flujo volumétrico (TFV), PrusaSlicer emplea la **Ecuación 5.6**.

$$TFV = A_{Filamento} \cdot V_{Extrusión} = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right) \cdot V_{Extrusión} \quad (Ec. 5.6)$$

Donde $A_{Filamento}$ es la superficie de la sección transversal del filamento que se está alimentando al cabezal extrusor en mm^2 (recordar que, PrusaSlicer siempre considera que la materia prima se encuentra en forma de filamento), D es el diámetro de este filamento (mm) y $V_{extrusión}$ es la velocidad a la cual es empujado el filamento a través de la boquilla (mm/s). PrusaSlicer obtiene $V_{Extrusión}$ empleando en el principio de conservación del flujo volumétrico sustituyendo las ecuaciones (5.5) y (5.6) en (5.1) obteniendo la **Ecuación 5.7**.

$$V_{Extrusión} = \frac{\left((w-h) \cdot h + \pi \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \cdot V_{Cabezal}}{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right)} \quad (Ec. 5.7)$$

Dado a que cada material presenta unas características diferentes, en muchos casos, la $V_{Extrusión}$ calculada por PrusaSlicer no es la adecuada y requiere de un pequeño ajuste para garantizar que las dimensiones del filamento extruido son las deseadas. Para esto, PrusaSlicer permite añadir un multiplicador de extrusión que se encarga de reducir/disminuir la velocidad a la cual es empujado el filamento hacia la boquilla, este multiplicador suele recibir el nombre de multiplicador M221. Por lo tanto, la velocidad de extrusión se calcula mediante la **Ecuación 5.8**.

$$V_{Extrusión} = M221 \cdot \frac{\left((w-h) \cdot h + \pi \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \cdot V_{Cabezal}}{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right)} \quad (Ec. 5.8)$$

En donde $M221$ es el multiplicador de extrusión, este parámetro es adimensional y se suele introducir de forma decimal. Por ejemplo, un valor $M221$ de 0,9 reducirá la $V_{Extrusión}$ en un 10 %.

En este estudio, dado a que se emplea la materia prima en forma de gránulos y estos son empujados por un husillo (**Figura 5.6**), el parámetro D (diámetro del filamento con el cual se está alimentando al cabezal extrusor) no tiene ningún significado físico y se le dará un valor fijo de 1,75. Por otro lado, la velocidad de giro del husillo dependerá de $V_{Extrusión}$ y de las características del motor que hace girar el husillo (número de pasos, relación de reducción...). Esta velocidad se puede calcular mediante la **Ecuación 5.9**.

$$V_{Husillo} = \frac{V_{Extrusión}}{\mu} = M221 \cdot \frac{\left((w-h) \cdot h + \pi \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \cdot V_{Cabezal}}{\mu \cdot \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right)} \quad (Ec.5.9)$$

En donde $V_{Husillo}$ es la velocidad a la que gira el husillo en r.p.s (revoluciones por segundo) y μ es una constante que relaciona la cantidad de filamento extruido con las revoluciones que ha de realizar el husillo para extruir esta cantidad de filamento. Esta constante se mide en mm / revolución y depende de las características del motor que gira el husillo. Puesto que $V_{Husillo}$ no se puede seleccionar a través de PrusaSlicer, la correcta selección de las variables de la **Ecuación 5.9** es clave para obtener las velocidades de giro del husillo deseadas.

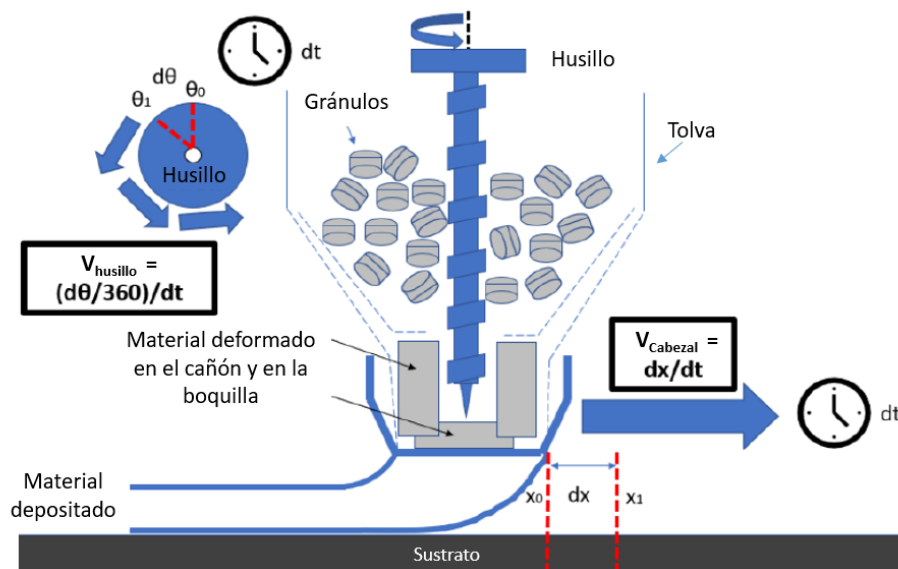


Figura 5.6. Esquematización del funcionamiento del cabezal extrusor de husillo empleado (Fuente: adaptado de [98]).

5.5 La relación $V_{Cabezal} / V_{Extrusión}$

Un parámetro que es de vital importancia controlar es la ratio $V_{Cabezal} / V_{Extrusión}$. Esta ratio no es más que la relación entre la velocidad a la que se mueve el cabezal ($V_{Cabezal}$) y la velocidad con la que está siendo extruido el material a través de la boquilla ($V_{Extrusión}$); esta relación no tiene unidades pues ambas velocidades se miden en mm/s. Una ratio $V_{Cabezal} / V_{Extrusión}$ incorrecta dará lugar a que los filamentos extruidos no presenten las dimensiones exigidas, por lo que se verán afectadas la geometría y propiedades mecánicas de la pieza impresa [94].

En el artículo publicado por Rane et al. [94] se estudia el efecto de la relación $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ en el filamento depositado. Según estos, cuando la velocidad del cabezal es superior a la del material que está siendo extruido (e.g. $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}} = 1,3$), el filamento depositado es estirado por la fricción con la cama de impresión/capa anterior produciéndose una reducción indeseada de su sección; en este caso el ángulo de contacto entre el filamento y la cama de impresión/capa anterior es inferior a 90° . Cuando la velocidad del cabezal es igual a la del material que está siendo extruido (e.g. $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}} = 1$), el ángulo de contacto es próximo a 90° , por lo que el filamento depositado no sufrirá variaciones dimensionales. Cuando la velocidad del cabezal es inferior a la del material que está siendo extruido (e.g. $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}} = 0,8$), el exceso de material extruido genera que el filamento depositado se comprima en exceso y se hinche; este fenómeno es más relevante en la primera capa y se conoce como “pie de elefante” (**Figura 5.7**) [78].

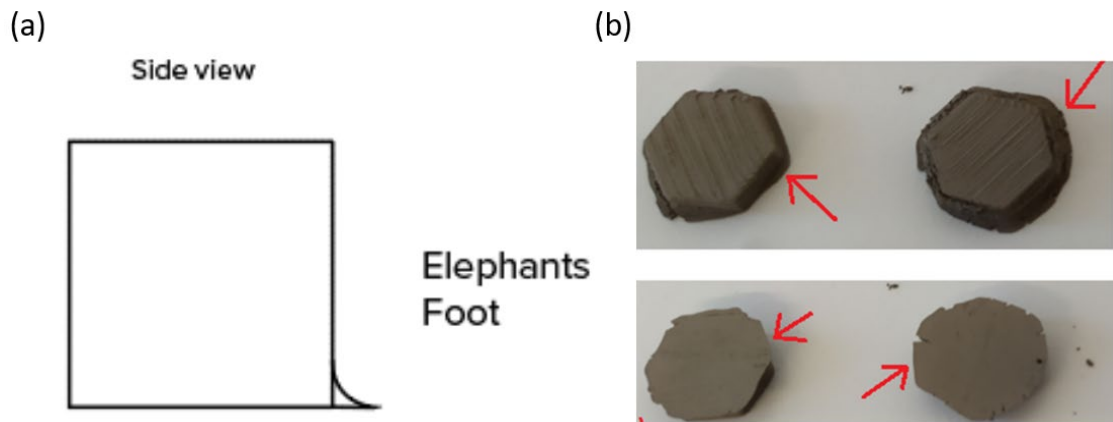


Figura 5.7. (a) esquema del defecto “pie de elefante” y (b) piezas impresas con un ratio $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ demasiado bajo en la primera capa en donde se puede apreciar el pie de elefante [20].

De acuerdo con lo expuesto por Rane et al., sería lógico intuir que una relación $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ igual a 1 es la adecuada, pero estos mismos investigadores señalan que no siempre es de esta forma ya que la $V_{\text{Extrusión}}$ se verá afectada por la viscosidad del material y otras características de la materia prima. Por lo tanto, la relación $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ más óptima dependerá del material empleado.

Se desea aclarar que, PrusaSlicer mantiene constante de forma automática la relación $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ durante la impresión. Por lo tanto, si se realiza la impresión de una capa con una V_{Cabezal} concreta y se desea imprimir la siguiente capa doblando la velocidad del cabezal, PrusaSlicer doblará automáticamente la $V_{\text{Extrusión}}$ para garantizar que la ratio $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ se mantiene

constante. Esta relación se puede romper empleando el multiplicador de extrusión M221 el cual tendrá un efecto sobre $V_{\text{Extrusión}}$ tal y como se puede observar en la **Ecuación 5.8**. Valores M221 superiores a 1 aumentarán la ratio $V_{\text{Cabezal}} / V_{\text{Extrusión}}$ mientras que valores M221 inferiores a 1 disminuirán la ratio [20].

5.6 Densidad de relleno y superposición

La densidad de relleno es la cantidad de material que llena la parte interna de la pieza impresa. PrusaSlicer permite modificar el porcentaje de material desde 0 % (pieza hueca) hasta 100 % (pieza completamente maciza) (**Figura 5.8**). El porcentaje de relleno más empleado suele ser del 20 %, este porcentaje permite obtener piezas con bajo peso, resistencia mecánica media/alta y con tiempos de impresión eficientes [20]. En este estudio se ha seleccionado una densidad de relleno del 100 % ya que el objetivo es fabricar piezas con la mayor densidad posible.

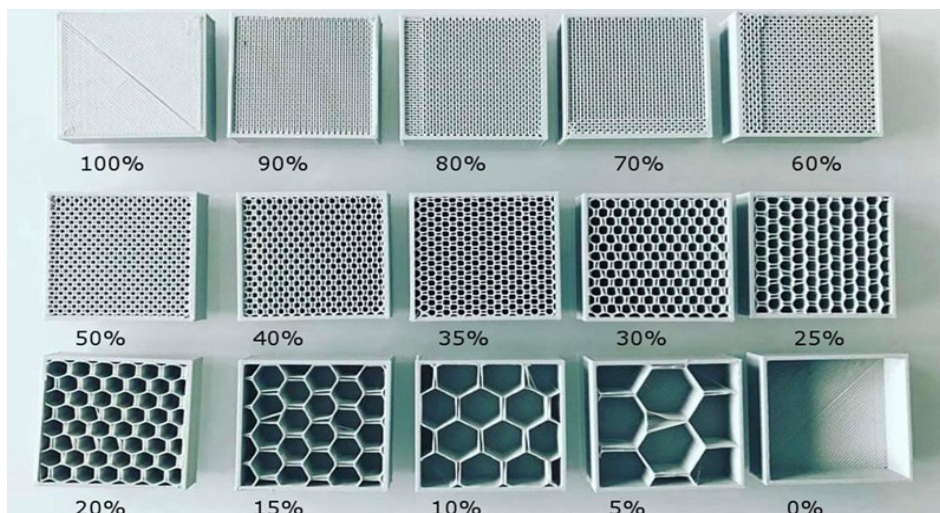


Figura 5.8. Piezas impresas con diferente densidad de relleno. (Fuente: my3dprintpro.com)

Cuando la densidad de relleno es del 100 %, PrusaSlicer emplea la **Ecuación 5.10** para calcular la distancia entre los centros de los filamentos adyacentes (S) de tal manera que los filamentos depositados se encuentren tangentes entre ellos (**Figura 5.9a**). Esta manera de depositar los filamentos da lugar a que se generen poros entre estos, disminuyendo considerablemente la densidad y las propiedades mecánicas de la pieza. Para solucionar esta problemática, PrusaSlicer permite asignar un parámetro conocido con el nombre de superposición. El parámetro de

superposición permite depositar los filamentos de forma que queden superpuestos entre ellos, reduciéndose así los poros (**Figura 5.9b**) [5][102]. En el estudio realizado por Riera [103], se recomienda una superposición del 50 % o superior en el caso de piezas fabricadas mediante MEAM-HP.

$$S = w - h \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec.5.10})$$

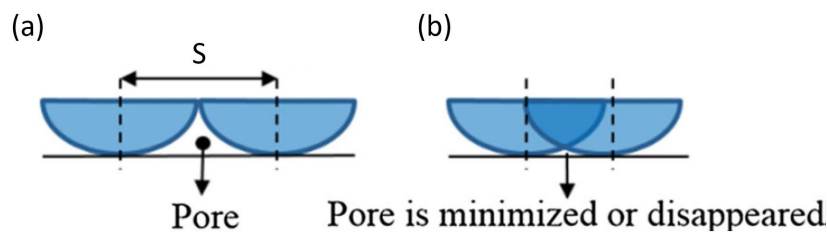


Figura 5.9. Esquema de dos filamentos adyacentes depositados (a) sin superposición y (b) con una superposición del 50 %. Al añadir superposición los poros se reducen [104].

5.7 Patrón de relleno

Las propiedades mecánicas de la pieza impresa se pueden ver afectadas por el patrón de relleno empleado. Existen una enorme variedad de patrones de relleno, algunos de los cuales se presentan en la **Figura 5.10** [105-106].

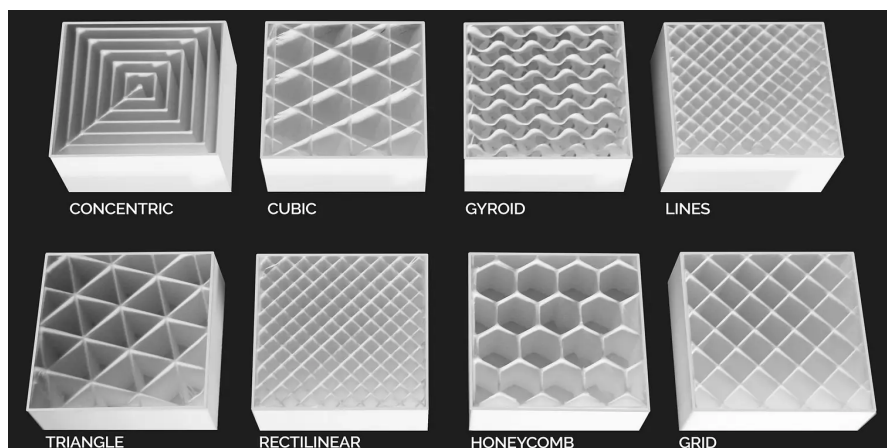


Figura 5.10. Piezas impresas con diferentes patrones de relleno. (Fuente: my3dprintpro.com).

En el artículo publicado por Ren et al. [105], se empleó la MEAM-HP para imprimir probetas de tracción másicas con un patrón rectilíneo con diferentes orientaciones ($60^\circ/-30^\circ$, $0^\circ/90^\circ$ y $45^\circ/-45^\circ$) (**Figura 5.11**). De estas, las probetas impresas con un patrón rectilíneo en una orientación $45^\circ/-45^\circ$ fueron las que presentaron una mayor resistencia mecánica. Por otro lado, en el artículo publicado por Iyer et al. [106] se demuestra que las deformaciones producidas por las tensiones térmicas que sufren las piezas impresas se pueden reducir con una correcta selección del patrón de relleno.

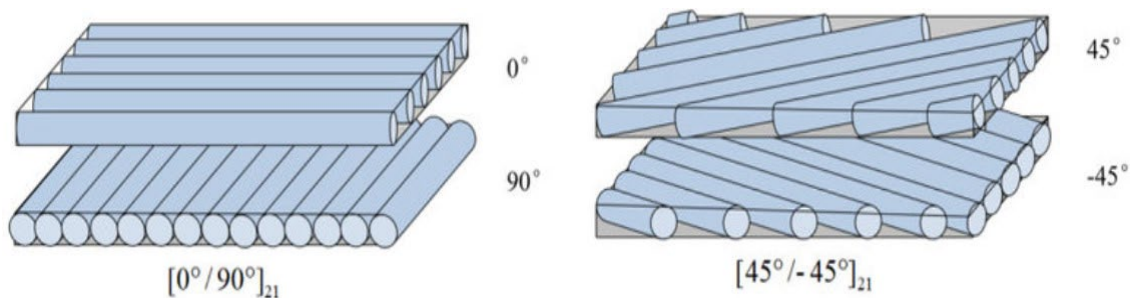


Figura 5.11. Ejemplo de patrones de relleno rectilíneos con diferente orientación (a) $0^\circ/90^\circ$ y (b) $45^\circ/-45^\circ$ [107].

5.8 Temperatura de extrusión y de la cama de impresión

En la MEAM-HP, la temperatura de extrusión ha de ser lo suficientemente alta como para garantizar que el aglutinante polimérico se encuentre completamente fundido, pero no tan alta como para que se degraden uno o varios de sus componentes o se den lugar a reacciones químicas no deseadas, lo que daría lugar a irregularidades en el flujo de material extruido. La adhesión de los filamentos aumenta al incrementar la temperatura de extrusión lo que mejora las propiedades mecánicas de la pieza impresa, pero se ha de ir con cuidado de no aumentar demasiado esta temperatura pues el módulo elástico de los filamentos extruidos se puede disminuir en exceso haciendo que no sean capaces de mantener su integridad geométrica y colapsen. Dado a que el flujo de material extruido se verá fuertemente afectado por la temperatura, la correcta selección de la temperatura de extrusión es de vital importancia para obtener los resultados deseados. La temperatura de extrusión óptima dependerá del material empleado y de los parámetros de impresión [100][108].

El control de la temperatura de la cama de impresión también es de extrema importancia para obtener unos buenos resultados. La cama de impresión se calienta para facilitar la adhesión de los filamentos depositados con la cama de impresión (en general, la adhesión entre los filamentos extruidos y la cama es mucho peor que entre filamentos) y para reducir las tensiones térmicas que sufrirá la pieza durante su impresión, estas tensiones pueden deformar la pieza (warping) (**Figura 5.12a-b**). Una temperatura de la cama demasiado elevada tampoco es deseable pues se puede producir el colapso de la pieza debido a una reducción excesiva del módulo elástico de los filamentos depositados (**Figura 5.12d**) [105].

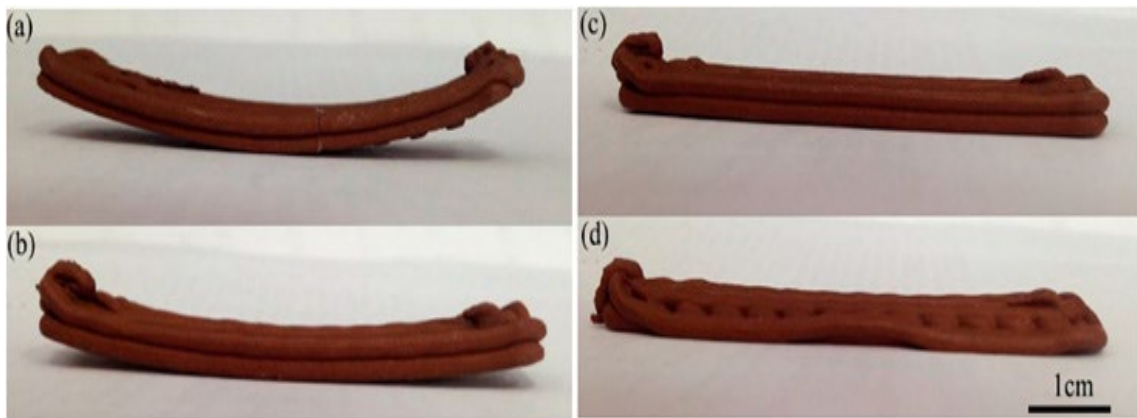


Figura 5.12. Piezas impresas empleando MEAM-HP con una temperatura de la cama de impresión de (a) 30°C; (b) 50°C; (c) 70°C y (d) 90°C. 30 y 50 °C (a-b) son temperaturas excesivamente bajas (deformación en la pieza). 90°C (d) es una temperatura excesiva (colapso de la pieza) y 70°C (c) es una temperatura ideal (ni deformación ni colapso) [105].

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materia prima

En este estudio, como materia prima, se han empleado 3 tipos de gránulos fabricados y suministrados por la empresa Colfeed (**Figura 6.1**).

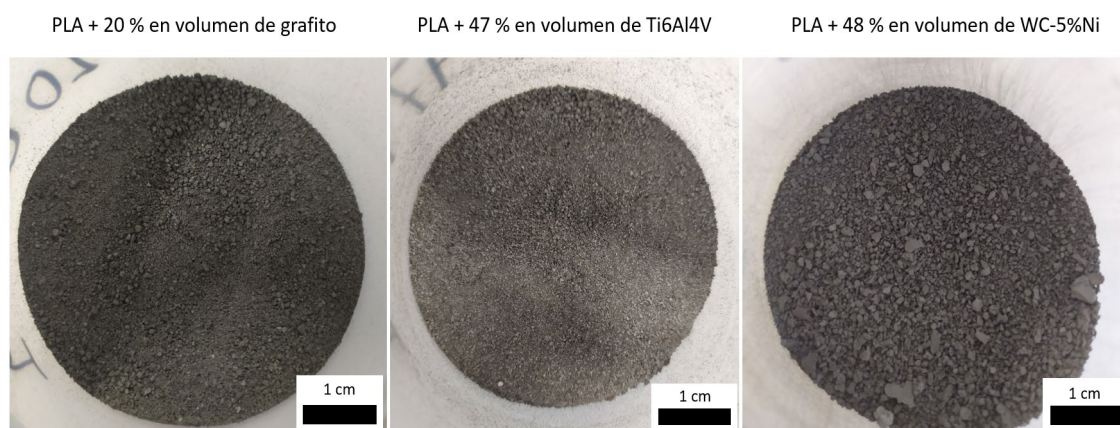


Figura 6.1. Fotografía de los diferentes gránulos estudiados.

Los gránulos están compuestos por un aglutinante polimérico cargado con partículas inorgánicas. Según el fabricante, la composición del aglutinante empleado en los 3 tipos de gránulos es muy similar, con la principal diferencia en la carga inorgánica (material y proporción en volumen). El fabricante no ha querido dar información precisa sobre la composición de los gránulos pues es secreto industrial. Todo y esto, el fabricante indica que los gránulos han sido fabricados mediante mezclado coloidal y que el principal componente del aglutinante es PLA, además las partículas inorgánicas se encuentran recubiertas por un polielectrolito encargado de mejorar la afinidad entre la matriz polimérica y las partículas inorgánicas y de limitar la reactividad superficial de las partículas inorgánicas, evitando su predisposición a la oxidación y la posterior disolución de oxígeno en su red cristalina durante el tratamiento térmico de sinterización [4][86-87]. En la **Tabla 6.1** se presenta la composición de los gránulos aportada por Colfeed.

Tabla 6.1. Composición aportada por Colfeed de los gránulos estudiados. Los gránulos están formados por una parte polimérica (aglutinante) y una parte inorgánica (carga). *El aglutinante polimérico está principalmente formado por PLA además de contener una pequeña cantidad de polielectrolito (< 2 % en volumen) que rodea a las partículas inorgánicas [4][86-87].

Material	Carga inorgánica (% en vol.)	Aglutinante polimérico * (% en vol.)
PLA + 20 % en volumen de grafito	20 % grafito	~80 %
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	47 % Ti6Al4V	~53 %
PLA + 48% en volumen de WC-5%Ni	48 % WC-5%Ni	~52 %

En cuanto a las características del polvo inorgánico, Colfeed tampoco ha suministrado información. De la literatura se puede extraer que la enorme mayoría de los polvos comúnmente empleados tanto para PIM como para MEAM-HP presentan unos tamaños de partícula inferiores a 20 µm con geometría esférica y distribución del tamaño de partícula multimodal [14][20]. Lo que da a pensar que es muy probable que la carga inorgánica que contienen los gránulos presentes estas características. Por último, en la **Tabla 6.2**, se muestran algunos datos de interés sobre los gránulos que ha compartido el fabricante.

Tabla 6.2. Densidades y temperaturas de fusión y de degradación de los gránulos suministrados por la empresa Colfeed.

Material	Densidad (g/cm³)	Temperatura fusión aglutinante (°C)	Temperatura degradación aglutinante (°C)
PLA + 20 % en volumen de grafito	1,44	152	320
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	2,76	151	300
PLA + 48% en volumen de WC-5%Ni	7,85	152	325

6.2 Sistema de impresión

6.2.1 La impresora AIMPLAS

Para el estudio de la viabilidad de impresión de los gránulos se ha empleado la impresora AIMPLAS (**Figura 6.2**). AIMPLAS es una impresora 3D híbrida multicabezal diseñada y fabricada por CIM UPC pensada para ser utilizada en investigación gracias a sus 5 cabezales de impresión (**Figura 6.3**). Los cabezales que dispone y algunas de sus posibles aplicaciones son:

- **2 cabezales de modelado por deposición fundida (FDM):** proceso de impresión más comúnmente empleado en donde se extruye un filamento continuo de un material termoplástico. Al disponer de dos cabezales, AIMPLAS puede imprimir piezas a una mayor velocidad hasta con dos materiales diferentes.
- **1 cabezal de pasta:** permite extruir pastas. Este tipo de cabezal tiene un gran interés en el mundo de los biomateriales pues entre sus aplicaciones se encuentra la capacidad de imprimir prótesis cerámicas.
- **1 cabezal de silicona:** permite extruir piezas de silicona, entre sus aplicaciones se encuentran la impresión de moldes o la impresión modelos anatómicos personalizados
- **1 cabezal extrusor de husillo para pellets:** Cabezal que permite utilizar pellets como materia prima. Este tipo de cabezal está ganando cada vez más interés dentro de la industria ya que es posible fabricar piezas metálicas y cerámicas al utilizar pellets termoplásticos con carga inorgánica. Este ha sido el cabezal empleado en este estudio para la impresión de piezas utilizando los gránulos como materia prima.

La impresora también cuenta con un sensor **BLTouch** que permite nivelar de forma automática la altura de los cabezales de extrusión respecto de la cama de impresión (**Figura 6.3**).



Figura 6.2. Impresora AIMPLAS vista desde diferentes puntos de vista: (a-b) frontal, (c) trasera y (d) lateral.

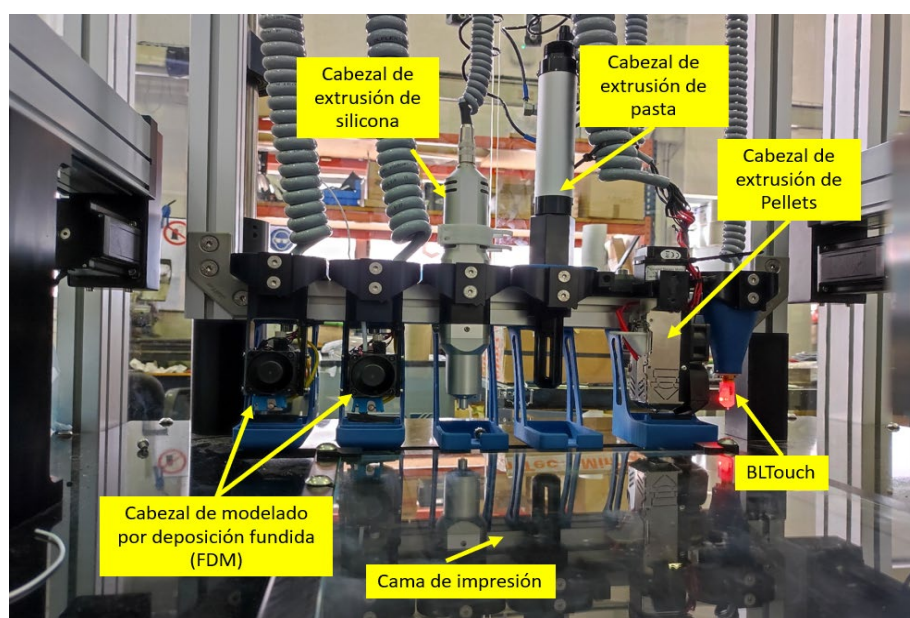


Figura 6.3. Fotografía de los diferentes cabezales de los que dispone la impresora AIMPLAS.

Los cabezales de la impresora AIMPLAS se encuentran instalados sobre unos soportes capaces de ser montados y desmontados con facilidad sobre una estructura de apoyo (**Figura 6.4a-b**). Gracias a esto, un gancho neumático es capaz de agarrarse al soporte del cabezal deseado y extraer el cabezal de la estructura de apoyo para realizar la impresión (**Figura 6.4c-d**). Una vez terminada la impresión, el gancho vuelve a colocar el cabezal en la estructura de apoyo. Este mecanismo permite realizar cambios de cabezal durante el proceso de impresión de una pieza de forma que sea posible imprimir piezas multimaterial empleando diferentes cabezales (por ejemplo, se podría imprimir una pieza de PLA y silicona empleando el cabezal FDM para extruir las partes de PLA y el cabezal de silicona para imprimir las partes de silicona).

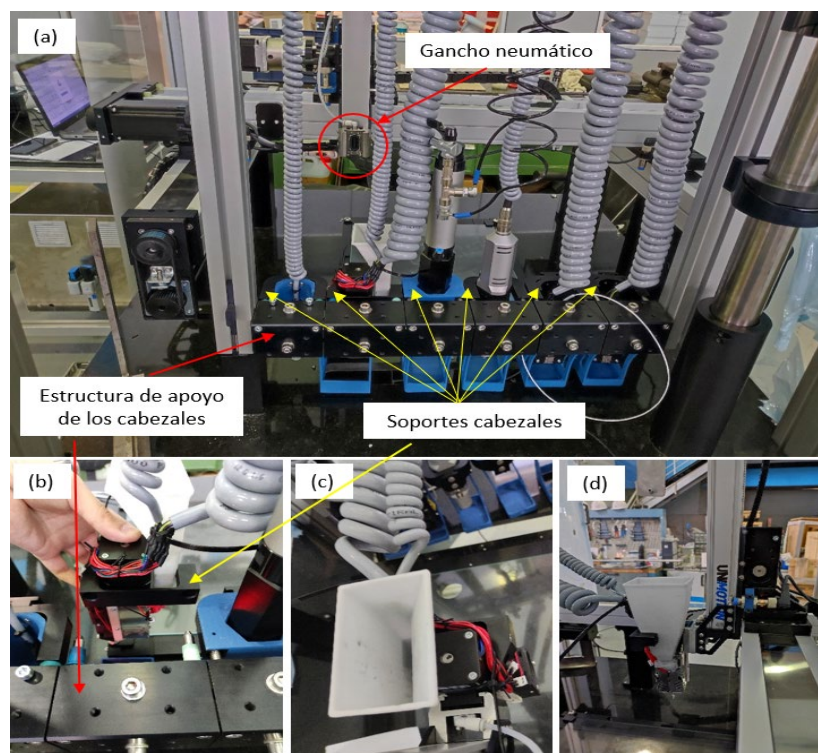


Figura 6.4. Fotografías de la impresora AIMPLAS mostrando el sistema empleado para el soporte y agarre de los cabezales; en (c-d) el gancho está agarrando el cabezal extrusor de pellets.

6.2.2 Trabajo realizado en la fabricación de la impresora AIMPLAS

En este apartado se va a presentar el trabajo realizado por mi parte en la fabricación de la impresora. La impresora ha sido diseñada por el equipo de I+D+i de CIM UPC y se ha montado en la planta piloto de CIM UPC por un equipo de 3 personas (incluyéndome). Se quiere aclarar que, el montaje de una impresora de esta envergadura no es una tarea sencilla y una gran parte

de horas dedicadas a este trabajo han consistido en la fabricación de esta. Por otro lado, debido a acuerdos de confidencialidad, no se va a poder entrar en muchos detalles sobre el proceso de fabricación, pero se espera que la información presentada a continuación sea suficiente para entender algunos de los pasos que se han de realizar para poder fabricar una impresora 3D.

6.2.2.1 Instalación de los cabezales y el sensor BLTouch

Debido a que los cabezales son una de las piezas claves en una impresora y tienen un enorme impacto en los resultados de las impresiones, es de vital importancia que la persona que maneja una impresora tenga un conocimiento básico de su funcionamiento/instalación. Puesto que la impresora AIMPLAS tiene una gran cantidad de cabezales diferentes (FDM, pasta, pellets...) la instalación de los cabezales es una excelente oportunidad para familiarizarse con una gran cantidad de tipos de cabezales de impresión que actualmente se encuentran en el mercado y en una gran cantidad de empresas dedicadas a la impresión 3D.

Los cabezales y su cableado van montados encima de una estructura de apoyo de aluminio. En la **Figura 6.5** se muestra una fotografía realizada durante la instalación del cableado de los cabezales en donde se indica la posición que ocuparán los cabezales una vez instalados, la posición y numeración de los cables principales y las zonas en donde se han realizado los diferentes empalmes. Las piezas de color azul que se pueden observar en esta misma figura facilitan la organización del cableado y fueron impresas con poliamida 12 (PA12) mediante selective laser sintering (SLS) y pintadas con una pintura protectora azul.

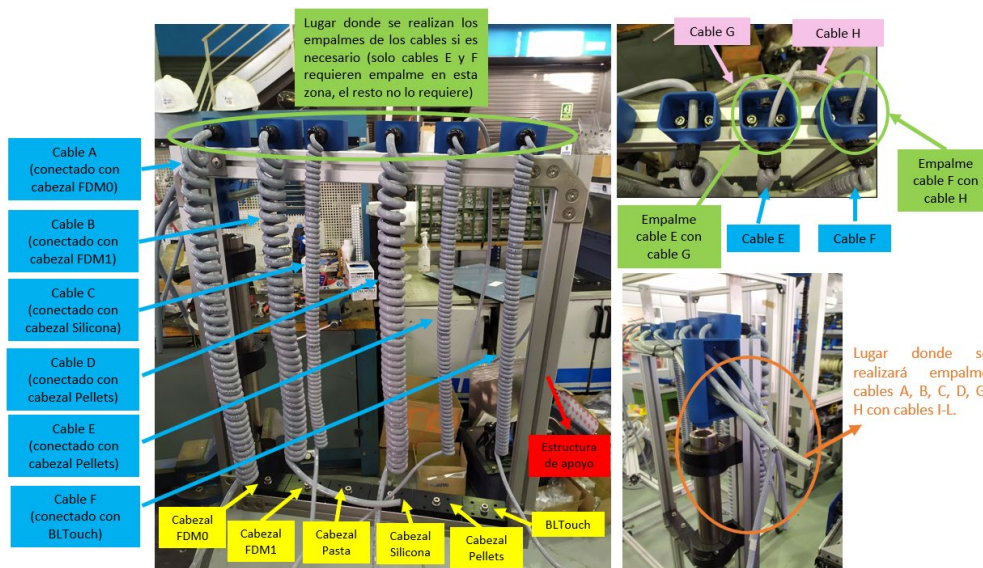


Figura 6.5. Imagen realizada durante el montaje de la impresora en donde se indica la posición y numeración de los cables principales y las zonas en donde se han realizado los diferentes empalmes.

En la **Figura 6.6** se aclara la nomenclatura empleada para los cables y sus conexiones; la nomenclatura permite reconocer a qué componente está conectado cada cable y conexión a la hora de realizar la instalación del sistema electrónico. Los cables se han numerado con letras. Los cables I y J tienen 20 conexiones. Los cables A, B y D tienen 12 conexiones. Los cables C, E, F, G, H, K y L tienen 4 conexiones. Las conexiones vienen numeradas/coloreadas de fábrica. Las conexiones se han nombrado según el siguiente formato: “*Letra del cable.Número de la conexión/color*”.

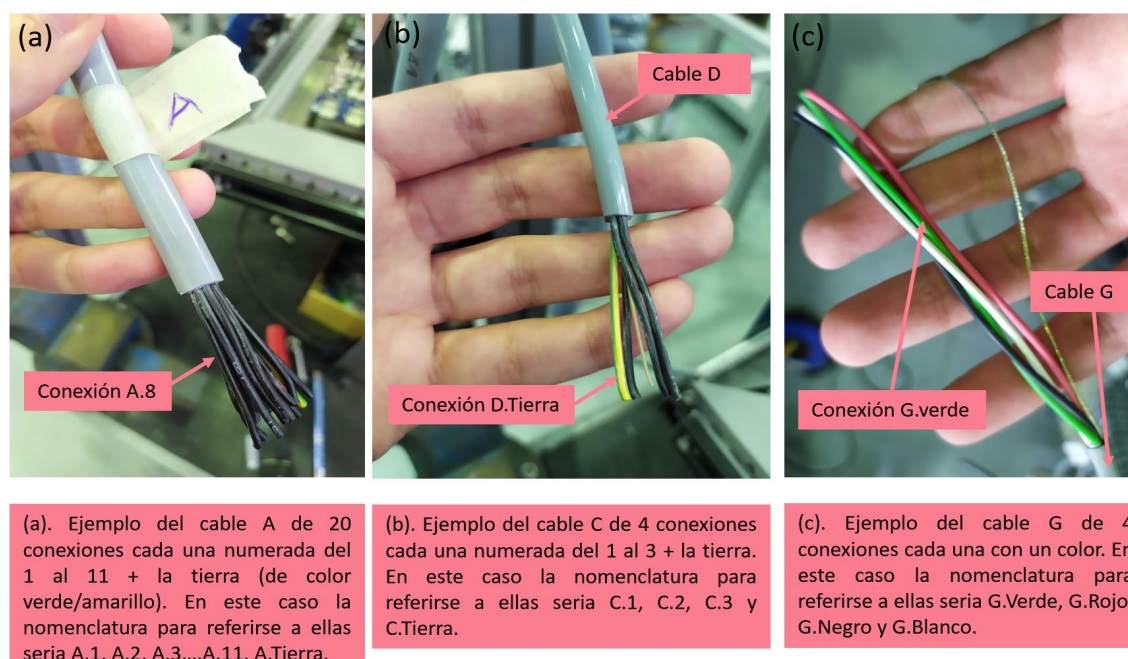


Figura 6.6. Nomenclatura empleada en el cableado.

En la **Figura 6.7** se presenta un diagrama del cableado de los cabezales y el sensor BLTouch mientras que en las tablas de la **Figura 6.8** se detallan cada uno de los empalmes realizados. En total se han realizado 104 empalmes. A cada uno de los componentes de los cabezales y el sensor BLTouch se les ha dado una referencia. Mediante las referencias es posible consultar las **Tablas A.1 y A.2** del **Anexo** para localizar rápidamente a qué componente corresponde cada conexión. Las referencias iniciadas en P corresponden a potencia (conexiones conectadas a motores y calefactores) mientras que las referencias iniciadas en S corresponden a sensor (conexiones conectadas a sensores y ventiladores). Es importante separar las conexiones de potencia y de sensor para evitar interferencias (todas las conexiones de potencia se han empalmado en los cables I y K mientras que las conexiones de potencia se han empalmado en los cables J y L).

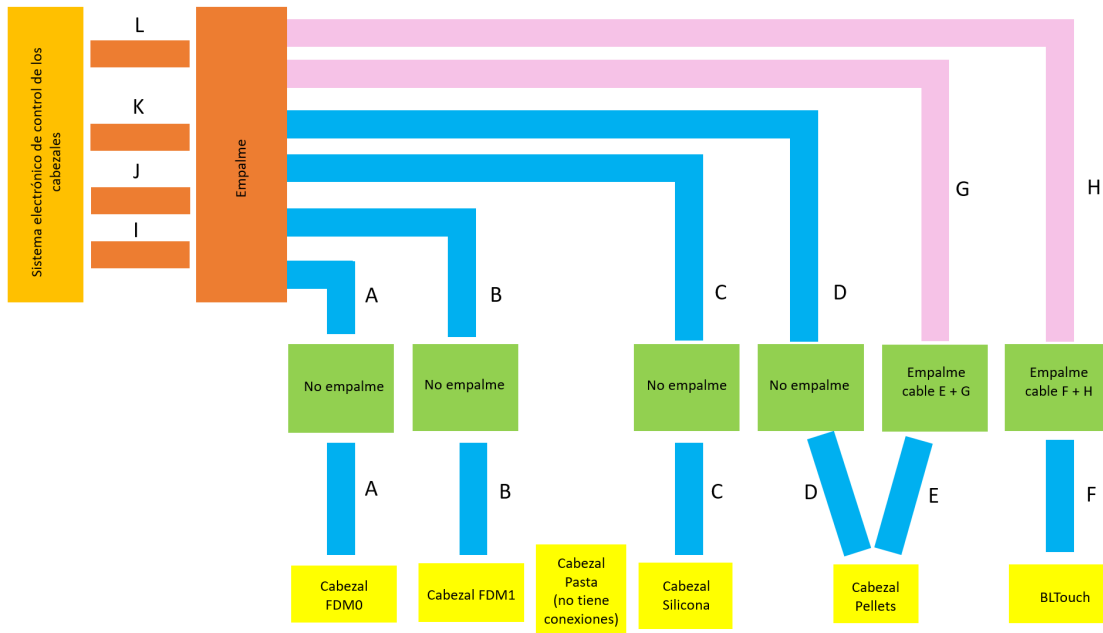


Figura 6.7. Diagrama del cableado de los cabezales y del sensor BLTouch.

Conexión cabezal FDM0 con cable A		Conexión cabezal FDM1 con cable B		Conexión cabezal Silicona con cable C		Conexión Pellets con cable D		Empalme cables A, B, C, G + Cable I (Potencia)		Empalme cables A, B, D + Cable J (Sensores)			
Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme		
P01	Azul (A+) → A.1	P07	Azul (A+) → B.1	P13	Azul (A+) → C.1	P21	(Heater 1 +) → D.1	P01	A.1 → I.1	S01	A.7 → J.1		
P02	Rojo (A-) → A.2	P08	Rojo (A-) → B.2	P14	Rojo (A-) → C.2	P22	(Heater 1 -) → D.2	P02	A.2 → I.2	S02	A.8 → J.2		
P03	Verde (B+) → A.3	P09	Verde (B+) → B.3	P15	Verde (B+) → C.3	P23	(Heater 2 +) → D.3	P03	A.3 → I.3	S03	A.9 → J.3		
P04	Negro (B-) → A.4	P10	Negro (B-) → B.4	P16	Negro (B-) → C.Tierra	P24	(Heater 2 -) → D.4	P04	A.4 → I.4	S04	A.10 → J.4		
P05	Amarillo (Heater 1 +) → A.5	P11	Amarillo (Heater 1 +) → B.5	Conexión Cabezal Pellets con cable E		S13	Rojo (PT+) → D.5	P05	A.5 → I.5	S05	A.11 → J.5		
P06	Amarillo (Heater 1 -) → A.6	P12	Amarillo (Heater 1 -) → B.6			S14	Negro (PT-) → D.6	P06	A.6 → I.6	S06	A.Tierra → J.6		
S01	Rojo (PT+) → A.7	S07	Rojo (PT+) → B.7	Ref.	Empalme	S15	(FAN+) → D.7	P07	B.1 → I.7	S07	B.7 → J.7		
S02	Negro (PT-) → A.8	S08	Negro (PT-) → B.8	P17	Azul (A+) → E.1	S16	(FAN-) → D.8	P08	B.2 → I.8	S08	B.8 → J.8		
S03	Rojo (FAN+) → A.9	S09	Rojo (FAN+) → B.9	P18	Rojo (A-) → E.2	S17	(Blow+) → D.9	P09	B.3 → I.9	S09	B.9 → J.9		
S04	Negro (FAN-) → A.10	S10	Negro (FAN-) → B.10	P19	Verde (B+) → E.3	S18	(Blow-) → D.10	P10	B.4 → I.10	S10	B.10 → J.10		
S05	(Blow+) → A.11	S11	(Blow+) → B.11	P20	Negro (B-) → E.Tierra	S19	Rojo (PT2+) → D.11	P11	B.5 → I.11	S11	B.11 → J.11		
S06	(Blow-) → A.tierra	S12	(Blow-) → B.tierra	Conexión BLTouch con cable F		S20	Negro (PT2-) → D.Tierra	P12	B.6 → I.12	S12	B.Tierra → J.12		
Empalme cable E + G (potencia)		Empalme cable F + H (sensor)				Empalme H + L (sensor)		P13	C.1 → I.13	S13	D.5 → J.13		
								P14	C.2 → I.14	S14	D.6 → J.14		
Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	Ref.	Empalme	P15	C.3 → I.15	S15	D.7 → J.15		
P17	E.1 → G.Negro	S21	F.1 → H.Negro	S21	Rojo (5V+) → F.1	S21	H.1 → L.Negro	P16	C.Tierra → I.16	S16	D.8 → J.16		
P18	E.2 → G.Verde	S22	F.2 → H.Verde	S22	Blanco (Zmin) → F.2	S22	H.2 → L.Verde	P17	G.1 → I.17	S17	D.9 → J.17		
P19	E.3 → G.Rojo	S23	F.3 → H.Rojo	S23	Naranja (control signal) → F.3	S23	H.3 → L.Rojo	P18	G.2 → I.18	S18	D.10 → J.18		
P20	E.Tierra → G.Blanco	S24	F.Tierra → H.Blanco	S24	Marrón + Negro (GND) → F.Tierra	S24	H.Tierra → L.Blanco	P19	G.3 → I.19	S19	D.11 → J.19		
Empalme D + K (potencia)		Empalme D + K (potencia)		Empalme D + K (potencia)		Empalme D + K (potencia)		P20	G.Tierra → I.20	S20	D.Tierra → J.20		
								Ref.	Empalme				
								P21	D.1 → K.Negro				
								P22	D.2 → K.Verde				
								P23	D.3 → K.Rojo				
								P24	D.4 → K.Blanco				

Figura 6.8. Tablas en donde se detallan todos los empalmes realizados junto con su referencia (Ref.). Las referencias iniciadas en P corresponden a potencia (conexiones conectadas a motores y calefactores) mientras que las referencias iniciadas en S corresponden a sensor (conexiones conectadas a sensores y ventiladores). A modo de ejemplo, el empalme Azul (A+) → A.1 indica que se ha conectado el cable azul (que corresponde a A+ del motor) con la conexión 1 del cable A. A+, A-, B+, B- corresponden a las bobinas del motor, Heater a los calefactores, PT a los sensores de temperatura, y FAN y Blow a los ventiladores.

Los empalmes se realizaron mediante soldadura de estaño y la soldadura se aisló con tubo termorretráctil (**Figura 6.9**). En la **Figura 6.10** se muestran varias fotografías del proceso de cableado.

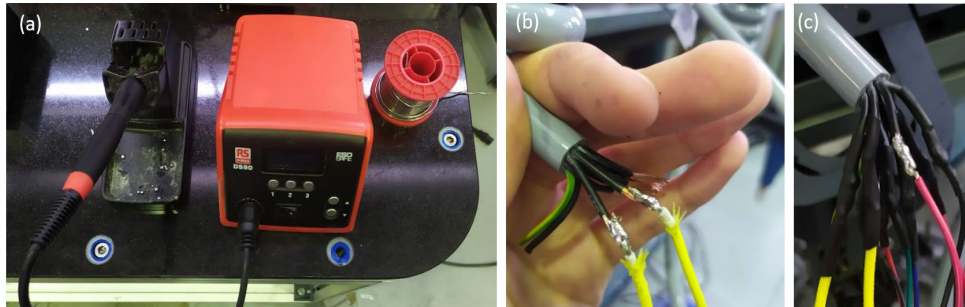


Figura 6.9. Fotografía de (a) soldador y cable de estaño empleados para empalmar los cables, (b) cables empalmados mediante soldadura de estaño y (c) soldaduras aisladas con el tubo termorretráctil.

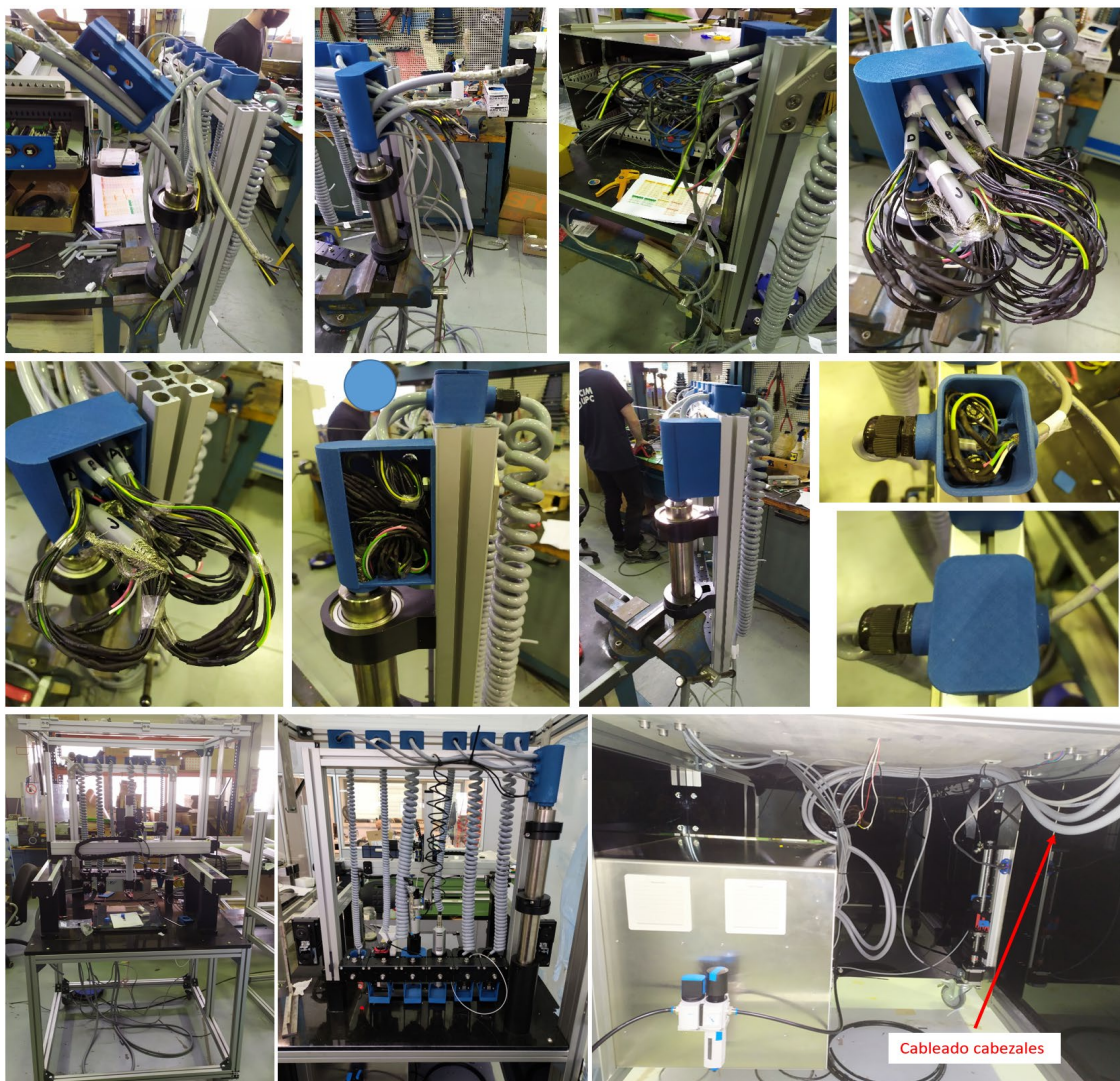


Figura 6.10. Fotografías realizadas durante el proceso de cableado de los cabezales y el sensor BLTouch.

El sensor de nivelación BLTouch se ha instalado sobre un soporte de PA12 impreso mediante SLS y pintado con una pintura protectora azul. A su vez, este soporte se ha instalado sobre un soporte de aluminio anodizado negro el cual permite montar el sensor en la estructura de apoyo. En la **Figura 6.11** se muestran algunas fotografías realizadas durante el proceso de instalación.

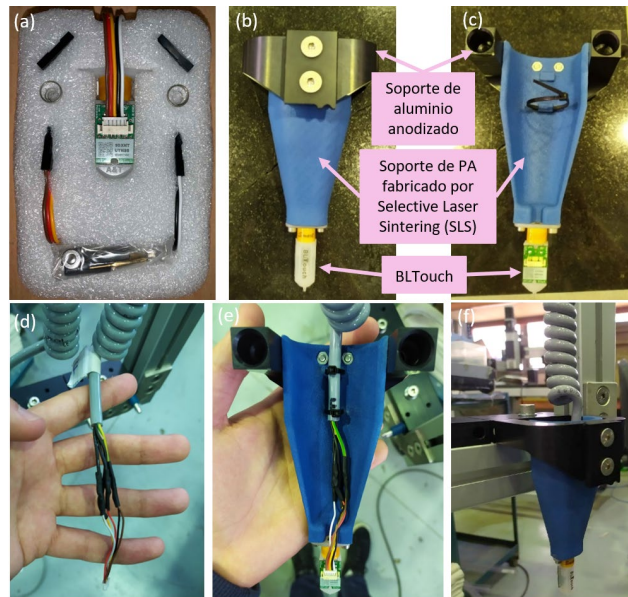


Figura 6.11. Fotografías realizadas durante el montaje del sensor BLTouch.

Los dos cabezales de FDM de la impresora AIMPLAS son cabezales e3D Extrusor Hemera Direct Kit. En la **Figura 6.12** se presentan algunas fotografías realizadas durante su montaje. Al igual que con el BLTouch, los dos cabezales se encuentran instalados sobre un soporte de aluminio anodizado negro el cual permite montarlos en la estructura de apoyo (**Figura 6.12f**).

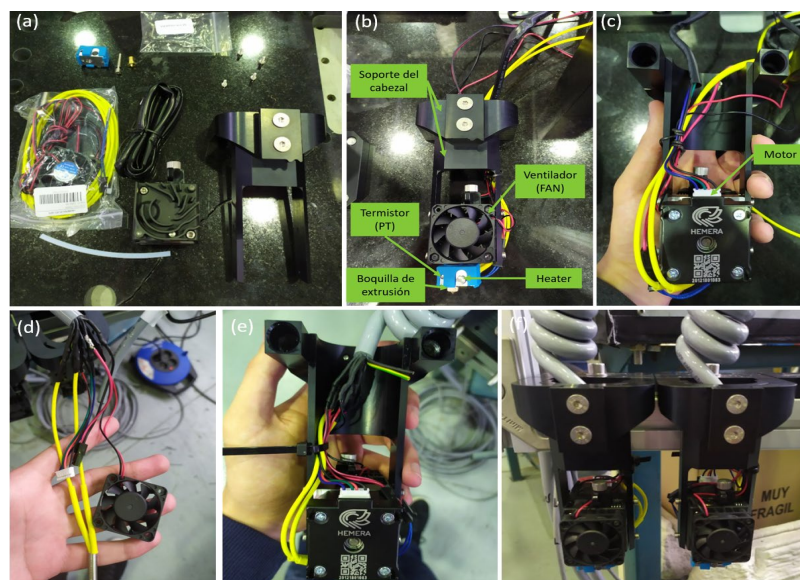


Figura 6.12. Fotografías realizadas durante el montaje de los cabezales de FDM.

El cabezal extrusor de husillo de la impresora AIMPLAS ha sido suministrado por Tumaker. Puesto que este es el cabezal que se ha empleado en este trabajo, se le han dedicado varios apartados propios más adelante (**Apartados 6.2.3 y 6.2.4**) hablando en detalle de sus características y de las diferentes modificaciones que se le realizaron para poder instalarlo en la impresora AIMPLAS y emplear los gránulos como materia prima. En la **Figura 6.13** se presentan algunas imágenes del montaje e instalación del cabezal.

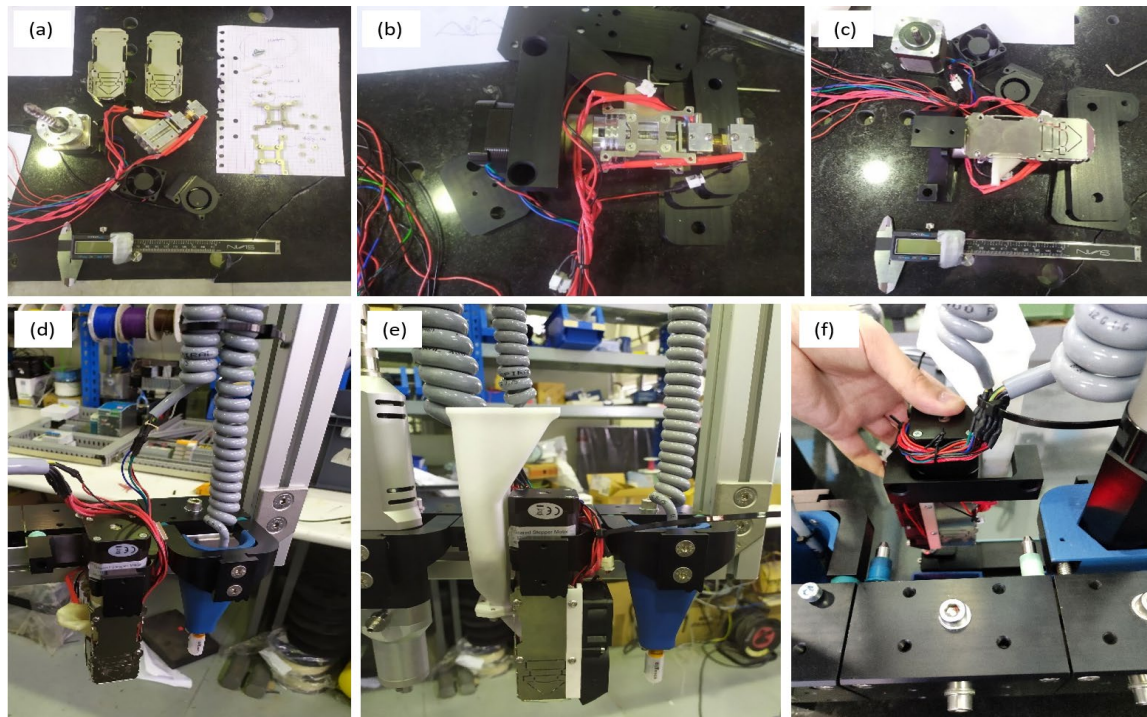


Figura 6.13. Fotografías del cabezal extrusor de husillo empleado para extruir los gránulos. (a-d) Durante el proceso de instalación. (e) cabezal instalado en la estructura de apoyo. (f) cabezal visto desde la parte trasera extraído de la estructura de apoyo.

El principio de funcionamiento de los cabezales de silicona y de pasta es similar. En estos, la materia prima (en estado líquido o pasta) se hace pasar por la boquilla sin necesidad de ser calentada. La principal diferencia de estos cabezales radica en la forma en la que es impulsada la materia prima hacia la boquilla. En el caso del cabezal de silicona, un motor es el encargado de mover una bomba que impulsa la silicona hacia la boquilla mientras que en el cabezal de pasta es un sistema neumático el que mueve un émbolo que empuja la pasta hacia la boquilla. El cabezal de silicona ha sido suministrado por ViscoTec mientras que el cabezal de pasta es un diseño propio de CIM UPC. La instalación del cabezal de silicona ha sido la más sencilla ya que solo consta de un motor, por lo que solo hay que soldar los cables del motor e instalar el soporte en el cabezal. Por otro lado, la instalación del cabezal de pasta es relativamente complicada pues

se ha de instalar un sistema neumático en la parte inferior de la impresora que permite que el cabezal pueda extruir material (**Figura 6.14**).

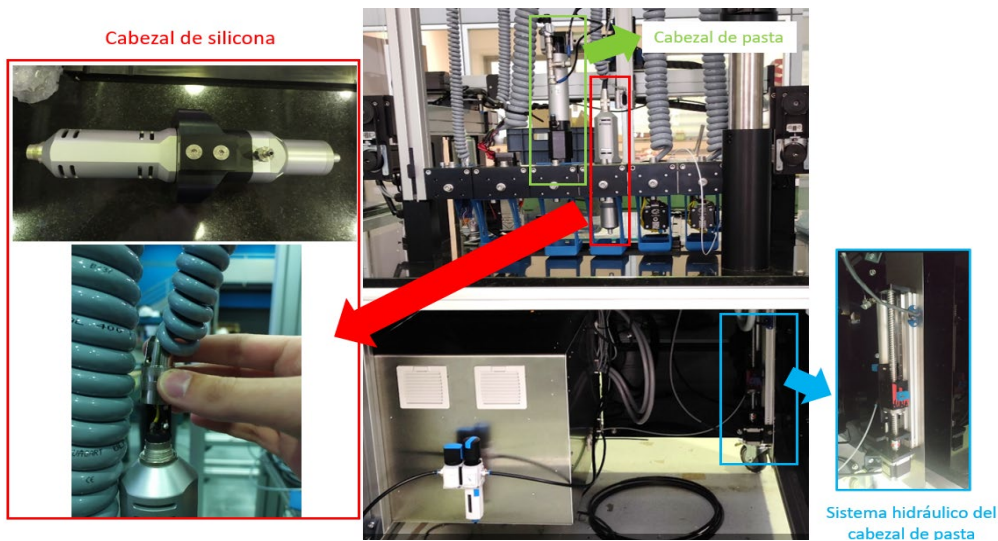


Figura 6.14. Fotografías del montaje del cabezal de silicona (rojo) y el cabezal de pasta (verde y azul).

Por último, tal y como se puede observar en la **Figura 6.15**, se instalaron unas bandejas de color azul en la parte inferior de la estructura de apoyo de los cabezales (impresas con PA12 mediante SLS y pintadas con una pintura protectora azul). Estas bandejas tienen la función de recoger los filamentos residuales que se pueden generar durante el proceso de impresión. Las bandejas tienen instalada una goma que fricciona con la boquilla de los cabezales cuando estos se extraen/colocan en la estructura de apoyo, de forma que los restos de filamento que pueden quedar colgando de la boquilla se adhieran a la goma limpiando así la boquilla; los cabezales de pasta y silicona no llevan gomas pues no la requieren ya que estos no tienen la problemática de que se queden filamentos colgando.

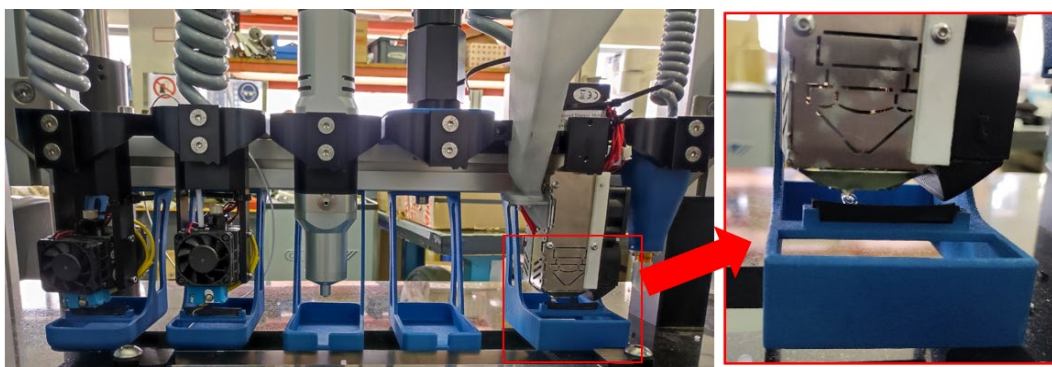


Figura 6.15. Bandejas instaladas debajo de la estructura de apoyo de los cabezales en donde se observa un filamento residual en la boquilla del cabezal de husillo adhiriéndose a la goma de la bandeja.

6.2.2.2 Montaje de la estructura, cama de impresión y sistema de agarre/movimiento de los cabezales

Otro trabajo realizado por mi parte durante la fabricación de la impresora fue colaborar en el montaje de su estructura, colocación del mármol e instalación de la cama de impresión y de los rieles que permiten el movimiento en el eje XYZ del gancho neumático que agarra los cabezales; la cama de impresión se encuentra instalada sobre un mármol para asegurar la máxima planitud y las menores vibraciones posibles. También colaboré en el montaje de la bomba de aire a presión del gancho neumático y en la instalación de las puertas traseras/delanteras y paneles laterales de metacrilato (**Figura 6.16**).

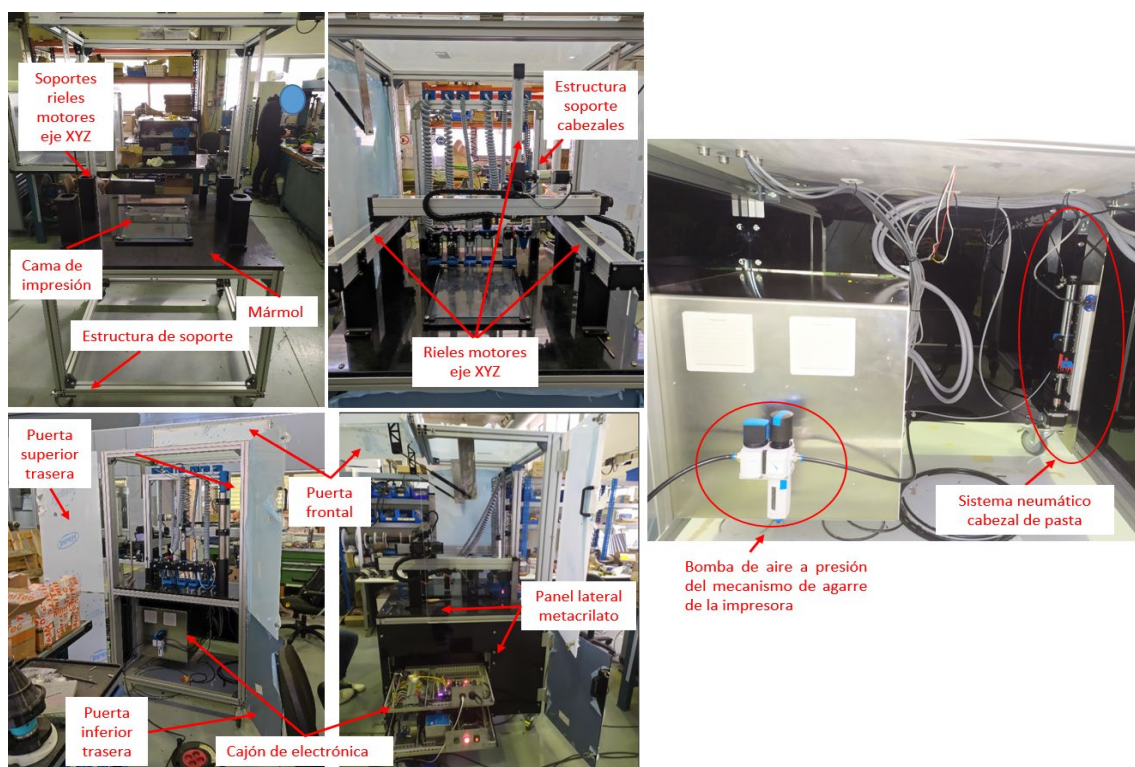


Figura 6.16. Fotografías de la impresora AIMPLAS en donde se indican algunos de los elementos en los que colaboré durante el montaje de la impresora.

6.2.2.3 Montaje del sistema electrónico y calibración de la impresora

Por último, se me encargó el montaje de la parte del sistema electrónico que controla los diferentes cabezales y colaborar en su calibración. Lamentablemente, en esta sección no se

puede dar mucha información pues es información confidencial. Aun así, se muestran algunas imágenes del trabajo de montaje del sistema electrónico (**Figura 6.17**).

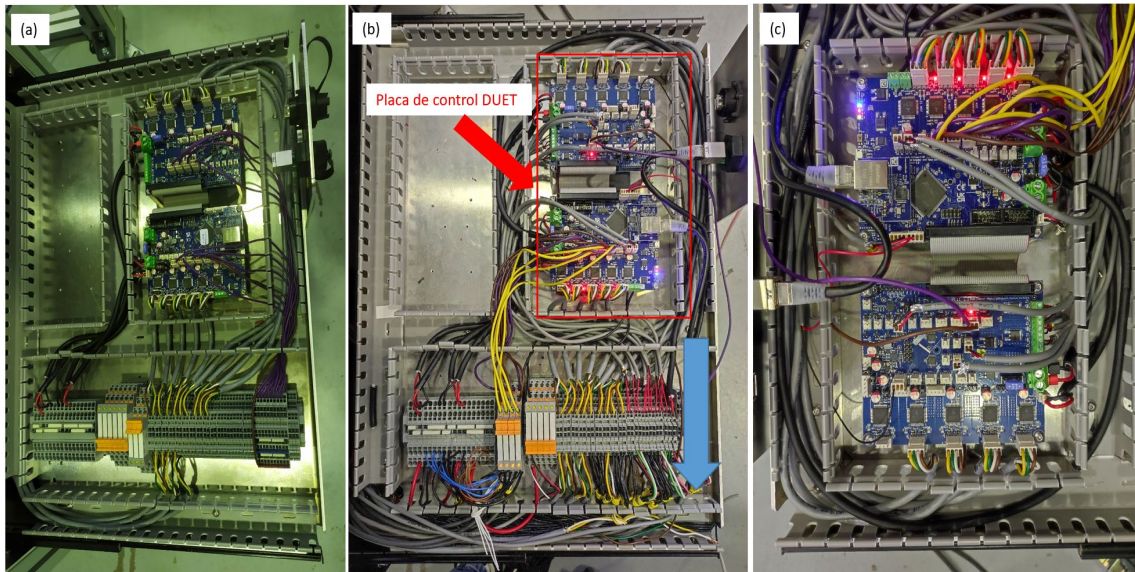


Figura 6.17. Fotografías de (a) sistema electrónico de AIMPLAS siendo montado, (b) sistema electrónico una vez montado, (c) close-up de la placa de control DUET encargada de controlar gran parte de los componentes de la impresora.

6.2.3 Cabezal extrusor empleado para la extrusión de los gránulos

En este trabajo, para la impresión de las piezas se ha empleado el cabezal extrusor de husillo de AIMPLAS (**Figura 6.18**), para más información sobre su instalación véase **Apartado 6.2.2.1**. Este cabezal ha sido fabricado por la empresa Tumaker y diseñado para usar pellets como materia prima. El cabezal es una versión miniaturizada y simplificada de un extrusor de polímeros convencional. La materia prima se introduce en la tolva a través de la cual entra en el barril en donde se funde y es empujada hacia la boquilla por un husillo girado por un motor paso a paso (motor NEMA 17 con una reducción 5:1). Para la fusión del material y el control de la temperatura se emplean dos calefactores y dos ventiladores a diferentes alturas de la largada del husillo (**Figura 6.19**).

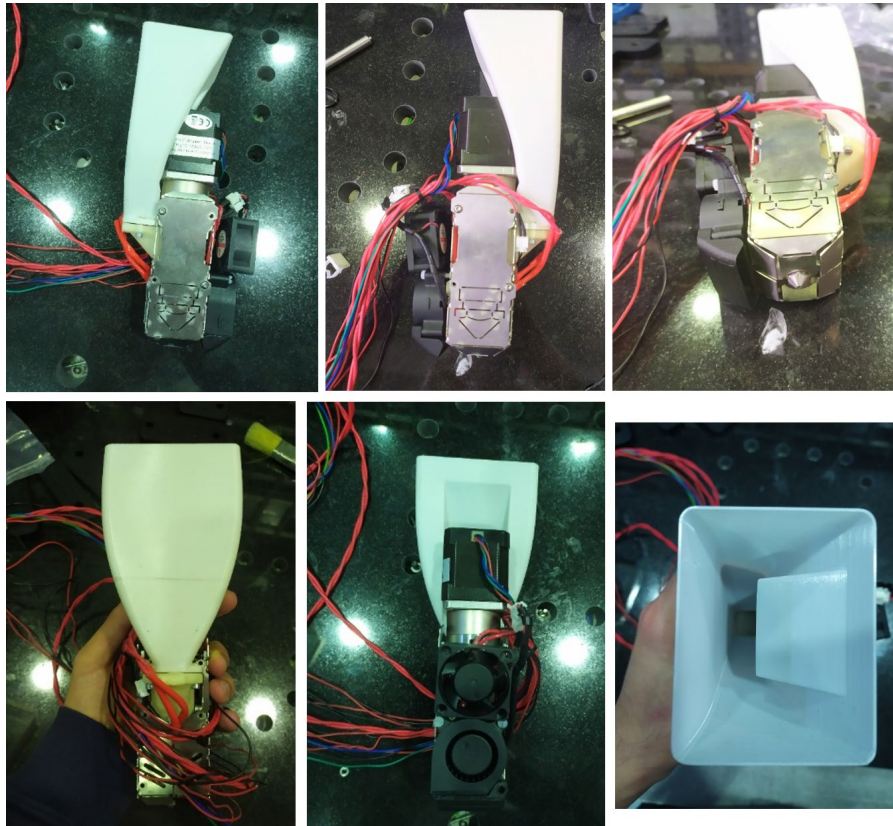


Figura 6.18. Fotografías desde diferentes puntos de vista del cabezal extrusor de husillo empleado en este trabajo para la fabricación de las piezas antes de su instalación en la impresora AIMPLAS.

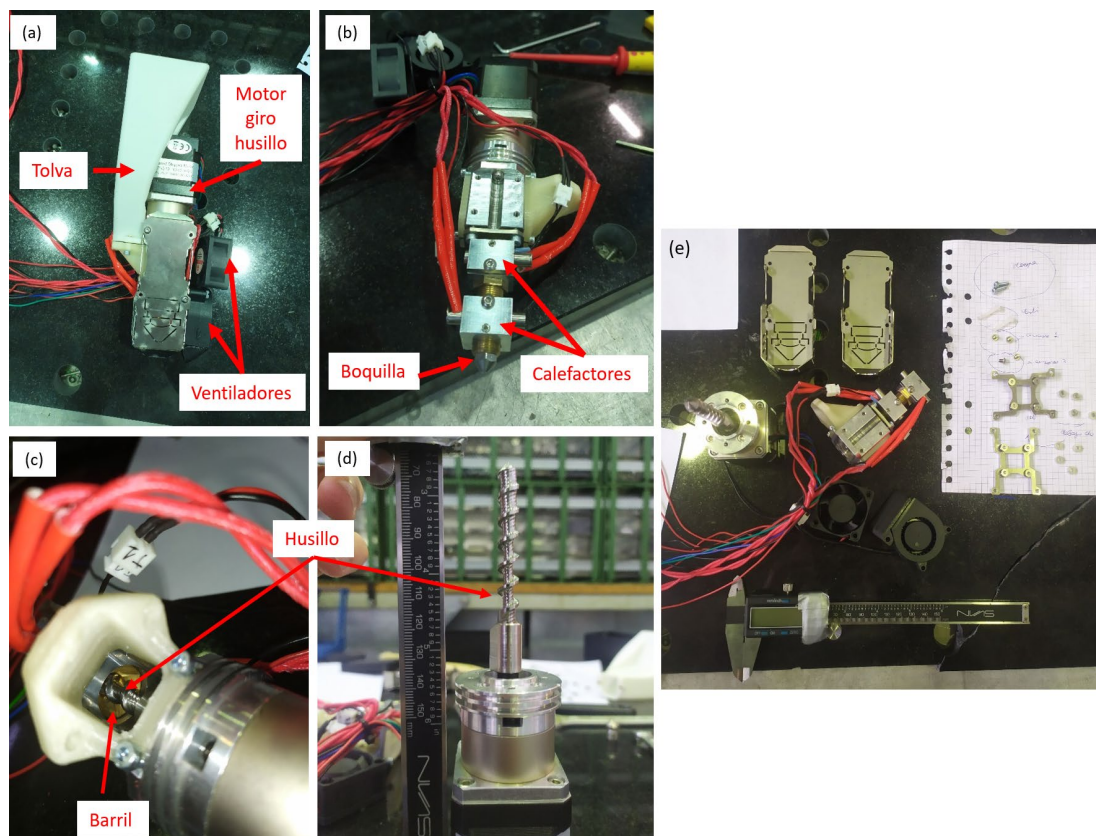


Figura 6.19. Principales elementos del cabezal extrusor de husillo empleado.

Una de las peculiaridades del cabezal extrusor utilizado en este estudio es el hecho de que el diseño de su husillo es muy similar al de los empleados en las máquinas inyectoras de polímeros, presentando 3 zonas claramente diferenciadas: alimentación (*feeding*), compresión (*compression*) y dosificación (*metering*) (**Figura 6.20a**); en la gran mayoría de cabezales extrusores del mercado para impresión 3D se emplean taladros de barrena los cuales solo tienen zona de alimentación (**Figura 6.20b**). El hecho de que el husillo empleado presente zona de compresión y dosificación permite obtener mayores presiones, facilitar la eliminación de gases atrapados y mejorar la fusión del material, su mezclado y homogeneidad lo que permite un mejor control del flujo de material extruido [110]. En la **Figura 6.21** y en la **Tabla 6.3** se detallan las dimensiones de la boquilla y del husillo empleado en el cabezal extrusor usado en este trabajo

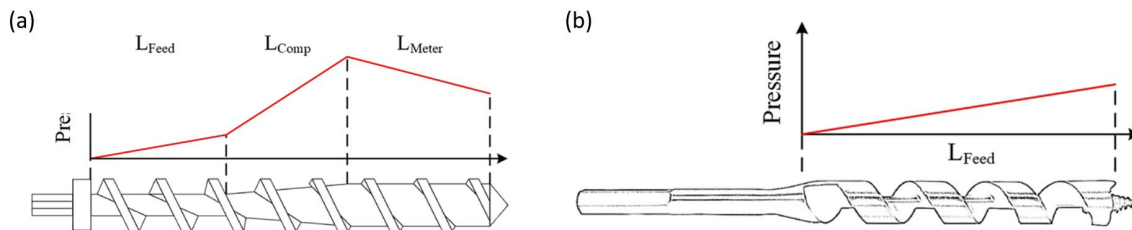


Figura 6.20. Comparación de los dos diseños de husillo comúnmente empleados en MEAM-HP junto con su perfil de presión. (a) husillo común de 3 zonas normalmente empleado en inyección de polímeros y (b) husillo de barrena [110].

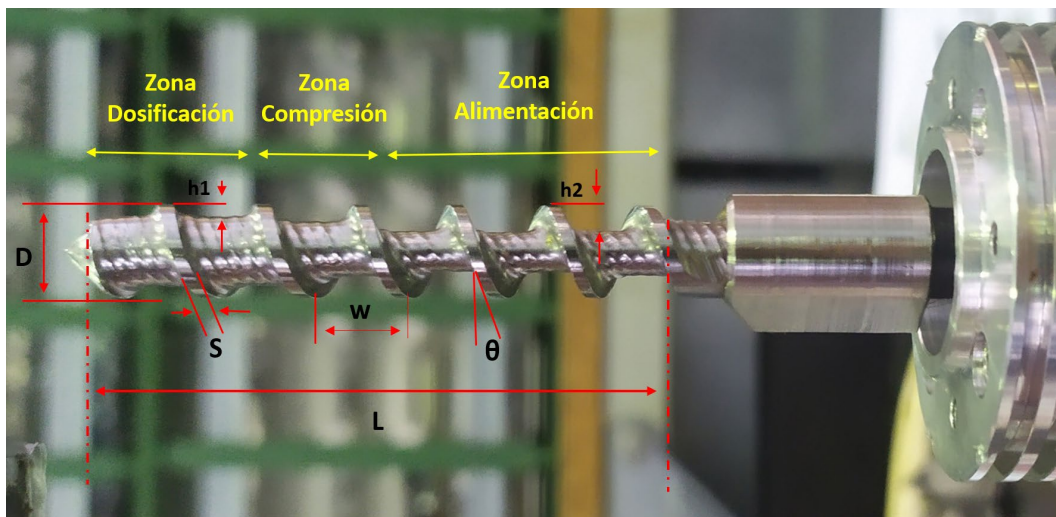


Figura 6.21. Imagen del husillo que contiene el cabezal empleado en este trabajo en donde se esquematizan sus dimensiones más relevantes. (Fuente: elaboración propia).

Tabla. 6.3. Dimensiones de la boquilla y del husillo instalados en el cabezal extrusor.

D_{Boquilla} (mm)	D (mm)	L (mm)	L/D	h_1 (mm)	h_2 (mm)	ratio de compresión h_2/h_1	W (mm)	S (mm)	θ (°)
0,8	8	55	6,9	6,3	4,4	0,7	9	1,5	20

6.2.4 Adaptación del cabezal extrusor a AIMPLAS y a los gránulos

En este apartado se van a presentar las diferentes modificaciones que se le han realizado al cabezal extrusor de husillo para que pudiera ser instalado en la impresora AIMPLAS y emplear gránulos como materia prima.

6.2.4.1 Rediseño y fabricación de la tolva

El cabezal extrusor de husillo empleado para la impresión de los gránulos disponía de una tolva preinstalada. Lamentablemente, esta tolva estaba diseñada para ser empleada con pellets y no con gránulos, por lo que presentaba orificios con un tamaño lo suficientemente grande como para que se pudieran escapar los gránulos (**Figura 6.22**, flecha roja). Otros problemas que surgieron con la tolva preinstalada fueron problemas de encaje en el soporte diseñado para que el cabezal extrusor se pudiera instalar en la impresora AIMPLAS (la tolva era demasiado grande para el soporte diseñado) y dimensiones inadecuadas para la correcta fluencia de los gránulos (como, por ejemplo, un ángulo de inclinación insuficiente en la tolva, **Figura 6.22**, flecha amarilla). Todo esto hizo que se decidiera rediseñar y fabricar una nueva tolva compatible con la impresora AIMPLAS y el empleo de gránulos como materia prima.

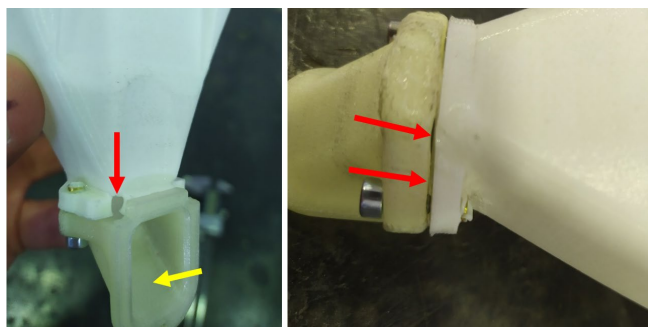


Figura 6.22. Tolva que venía preinstalada en el cabezal extrusor de husillo. (Flechas rojas) orificios por donde se pueden escapar los gránulos y (flecha amarilla) ángulo de inclinación insuficiente para gránulos.

La tolva se diseñó empleando SolidWorks y se imprimió con Poliamida 12 mediante SLS; una fotografía de la impresora de SLS empleada para imprimir las diferentes piezas diseñadas en este estudio se presenta en la **Figura 6.23** mientras que una explicación de su funcionamiento se puede encontrar en el **Apartado 2.3**. Una imagen del diseño realizado en Solid Works se presenta en la **Figura 6.24**; en esta misma figura se puede observar como la tolva diseñada se ajusta al cabezal extrusor y al soporte que permite instalar el cabezal en la impresora AIMPLAS (**Figura 6.24c-f**). Los planos se adjuntan en el **Anexo A.2**. El resultado final tras imprimir la tolva se presenta en la **Figura 6.25**. La tolva consta de 2 piezas: una pieza principal que sería la tolva propiamente dicha y una pieza secundaria que actúa de “garganta” (**Figura 6.24a**). Dado a que la garganta es el elemento que presenta las dimensiones más estrechas y el menor ángulo de inclinación, sus dimensiones serán las que dictaminarán el flujo de los gránulos (unas dimensiones inadecuadas provocan atoramientos o flujos irregulares de material). Se desea aclarar que el diseño de la tolva se ha visto limitado por la forma en la que está diseñado el cabezal extrusor y su soporte, por lo que algunas de las dimensiones de la tolva se han tenido que ajustar más de lo deseado a las dimensiones mínimas requeridas pues no había otra opción. En la **Tabla 6.4** se muestran las dimensiones mínimas que ha de presentar la tolva para garantizar el flujo de los gránulos. En esta misma tabla se presentan los valores seleccionados para la tolva fabricada. La metodología empleada para obtener las dimensiones mínimas requeridas en la tolva se desarrolla en los **Apartados 4, 6.3 y 7.1**.



Figura 6.23. Impresora 3D de SLS empleada para la impresión de las diferentes piezas diseñadas y fabricadas en este trabajo [1].

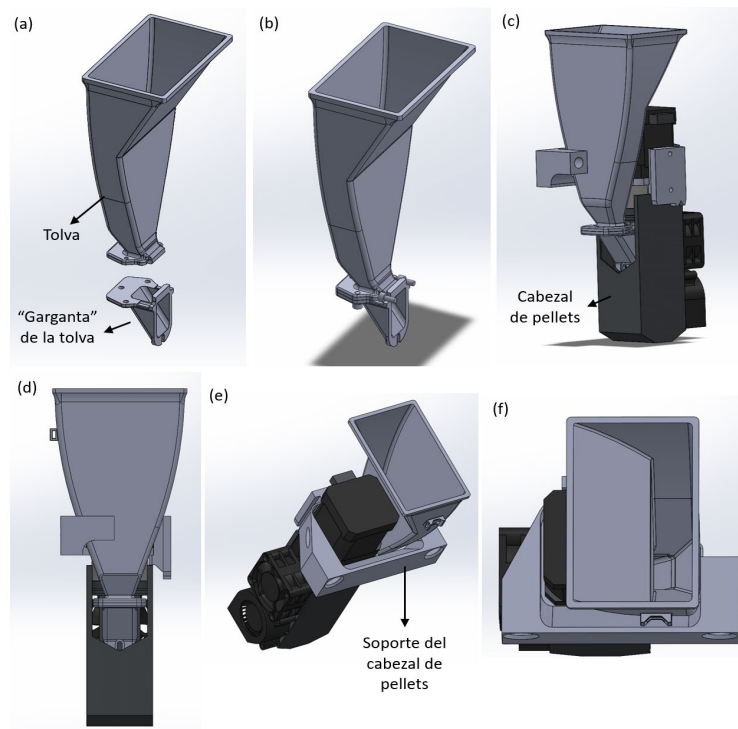


Figura 6.24. Imagen de SolidWorks de: (a) las dos piezas que conforman la tolva, (b) tolva montada. (c-f) cabezal extrusor con la tolva instalada y montado en el soporte visto desde diferentes puntos de vista.

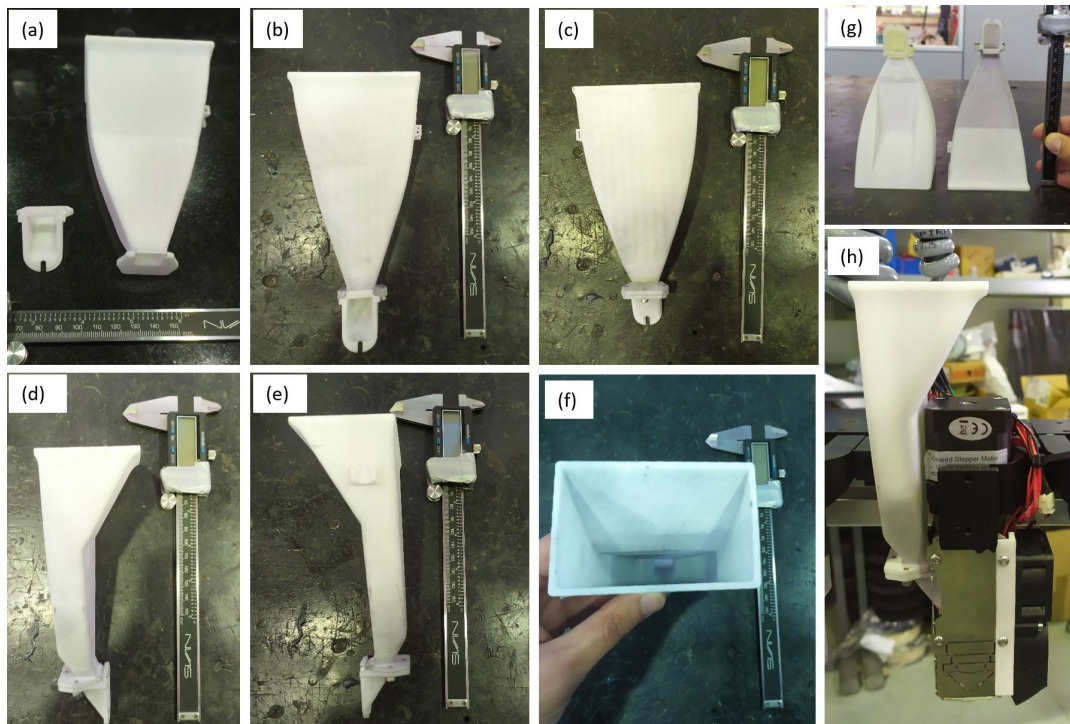


Figura 6.25. Fotografías de la tolva diseñada e impresa en 3D de (a) las dos partes que conforman la tolva, (b-f) las dos partes unidas mediante tornillos vistas desde diferentes puntos de vista. (g) tolva que venía preinstalada comparada con la impresa (h) cabezal extrusor con la tolva instalada y montado en la impresora AIMPLAS.

Tabla 6.4. Valores mínimos que han de presentar las dimensiones de la tolva a fabricar para garantizar el flujo de los gránulos junto con los valores seleccionados para fabricar la tolva. *D es la apertura superior de la tolva mientras que h es la altura de la tolva (véase Apartado 4.4 y Figura 4.6 para más información).

	Orificio de salida (d) (mm)	Inclinación mínima (β) (°)	Relación h/D*
Valor mínimo	$\varnothing$ 12,9	51,3	1
Valor seleccionado para la tolva	15,9 x 14	54,5	1,4

6.2.4.2 Otras modificaciones en el cabezal extrusor

Los dos ventiladores de los que dispone el cabezal extrusor de husillo venían fijados de fábrica por tornillos de plástico de muy mala calidad, lo que dificulta mucho el desmontaje de los ventiladores y su correcto posicionamiento/fijación; para un cabezal que se va a emplear en investigación y el cual requiere de un fácil desmontaje esto no es algo admisible. Por lo tanto, se diseñó y fabricó un nuevo sistema de soporte que permitiera un fácil desmontaje y posicionamiento/fijación de los ventiladores. El sistema de soporte diseñado y fabricado se presenta en la **Figura 6.26a** (los planos se pueden encontrar en el **Anexo A.2**), este consta de dos piezas impresas con PA12 mediante SLS sobre la cual se instalan los dos ventiladores empleando tornillos convencionales (**Figura 6.26b-c**). El sistema de soporte está diseñado de tal forma que se puedan encajar con facilidad en la carcasa metálica del cabezal extrusor (**Figura 6.26e-f**).

El cabezal presenta una rendija de ventilación justo debajo del ventilador superior (**Figura 6.26d**, marcada con una flecha roja), esta rendija es lo suficientemente grande como para permitir que los gránulos puedan escaparse por allí durante el proceso de extrusión. Por lo tanto, se colocó una tela sobre la rendija de forma que se pudiera ventilar a la vez que se evitan fugas de material (**Figura 6.26e**).

Por último, para poder colocar el cabezal en la impresora AIMPLAS, este se tuvo que instalar sobre un soporte metálico. Este soporte está diseñado de forma que el cabezal extrusor pueda ser desmontado y montado encima del soporte (**Figura 6.26f-g**).

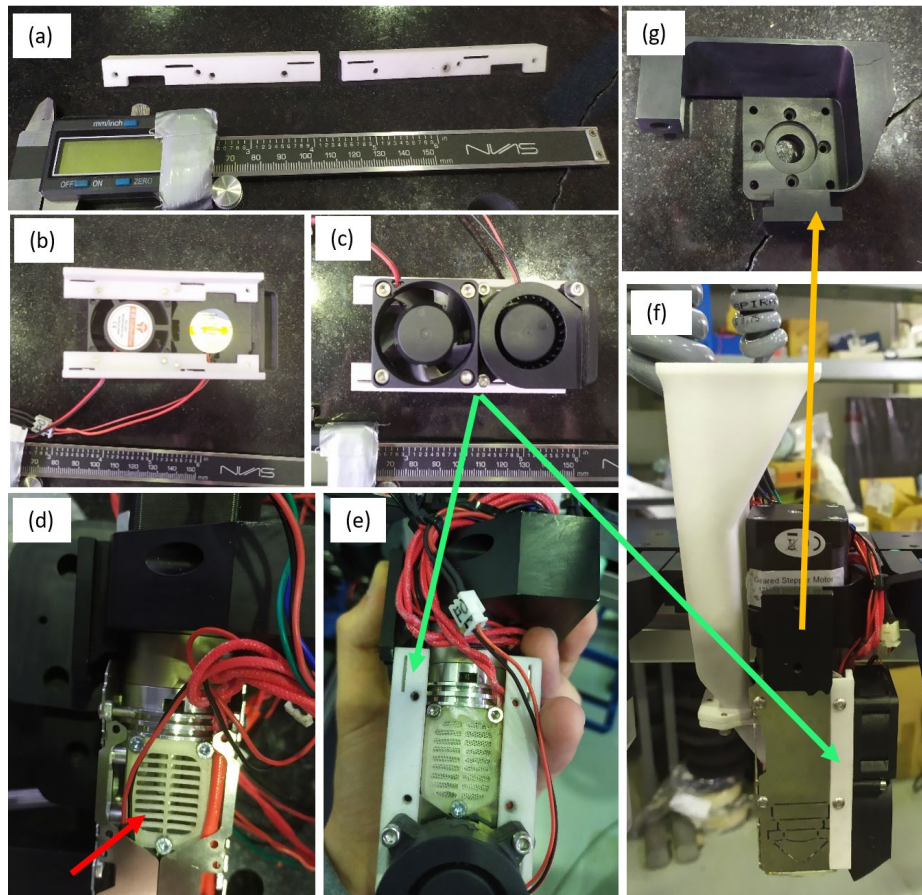


Figura 6.26. Fotografías de: (a) las dos piezas que conforman el sistema de soporte diseñado y fabricado para los ventiladores, (b-c) vista inferior y superior de los ventiladores montados sobre el soporte, (d) rendija de ventilación por la que se pueden salir los gránulos (marcada con una flecha roja), (e) rendija tapada con una tela para que no se salgan los gránulos, (f) soportes montados sobre el cabezal, (g) soporte que permite instalar el cabezal extrusor en la impresora AIMPLAS.

6.3 Obtención de las propiedades características de los gránulos y de las dimensiones mínimas de la tolva

6.3.1 Obtención de la geometría y distribución del tamaño de los gránulos

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 4.1**, uno de los parámetros que pueden afectar a la fluidez de los gránulos es su geometría y distribución del tamaño de partículas. Es por esto que los gránulos se han observado mediante microscopía óptica para examinar su geometría y obtener su distribución del tamaño de partícula.

Para la observación de los gránulos se ha empleado el microscopio óptico industrial “38 MP FHD camera V6” de la marca KOPPACE (**Figura 6.27a-b**). Dado a que no se disponía de un soporte adecuado, el microscopio se ha soportado sobre unas cajas de cartón y se ha conectado a un ordenador para poder analizar la imagen (**Figura 6.27c**). Para iluminar la muestra se ha empleado una linterna con una bombilla led blanca.

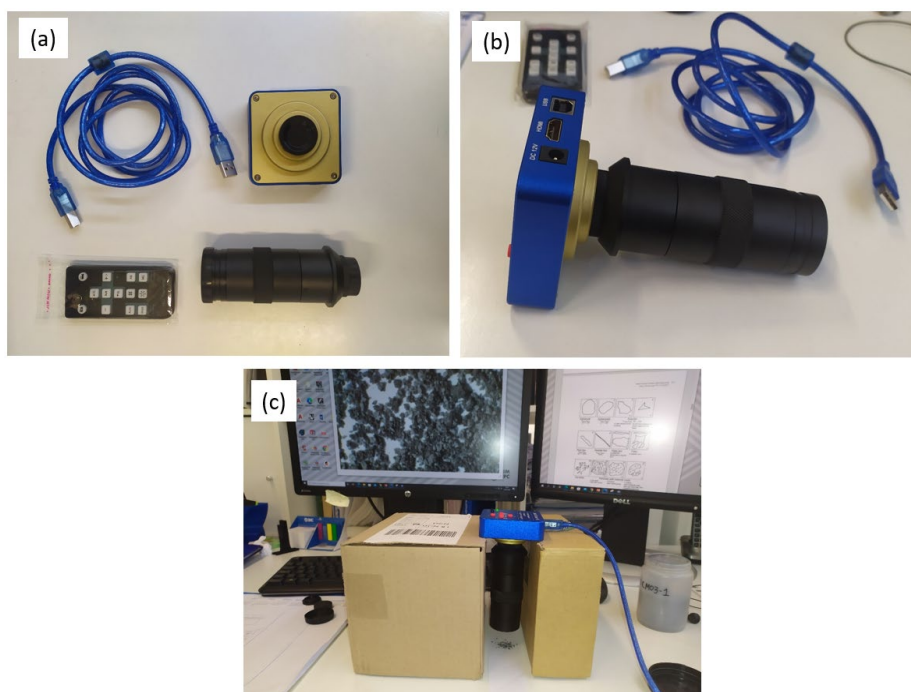


Figura 6.27. Fotografías de (a-b) microscopio óptico industrial “38 MP FHD camera V6” y (c) del montaje empleado para observar los gránulos.

Para la obtención de la distribución del tamaño partícula de los gránulos se ha empleado el programa de procesamiento de imagen *ImageJ*. Según el estándar ISO 13322-1, “*Particle Size Analysis – Image Analysis Methods – Part 1: Static Image Analysis Methods*”, para obtener una distribución del tamaño de partícula con una elevada confiabilidad se han de analizar entre 5.000 y 60.000 tamaños de partícula, esto es algo que no es posible de realizar de forma manual (o requeriría de una enorme cantidad de tiempo). Por lo tanto, dado a que en nuestro caso únicamente se busca obtener una aproximación de la distribución de partículas a efectos de comparación con los diferentes gránulos y no es necesario una precisión tan elevada, se han medido 200 partículas de cada tipo de gránulo. Dado a que las partículas no eran circulares se midió la dimensión más larga (tal y como se esquematiza en la **Figura 6.28**), de esta forma se obtuvo el tamaño máximo de cada una de las partículas, dato que es de vital importancia conocer para evitar posibles atascos en la tolva / sistema de alimentación.

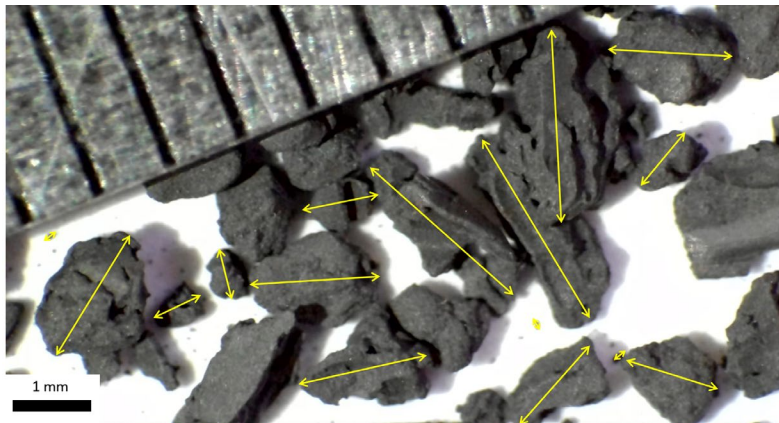


Figura 6.28. Imagen de microscopía óptica de las partículas de los gránulos de 48 % en volumen de WC/Ni en donde se indica, en amarillo, la forma en la que se han medido las diferentes partículas en el programa ImageJ. En esta misma imagen, en la parte superior izquierda se puede observar la regla empleada como guía para realizar el cálculo de las dimensiones de las partículas.

6.3.2 Obtención del ángulo de reposo

Para la obtención del ángulo de reposo de los diferentes gránulos estudiados, se empleó la metodología esquematizada en la **Figura 6.29a**. Los gránulos se vertieron a través de un embudo colocado a una altura de 5 cm del suelo hasta formar un montón con una altura de 4 cm. Los montones se fotografiaron y, empleando el programa de procesamiento de imagen ImageJ (**Figura 6.29b-d**), se obtuvo el ángulo de reposo. Se realizaron 3 mediciones para cada uno de los gránulos estudiados.

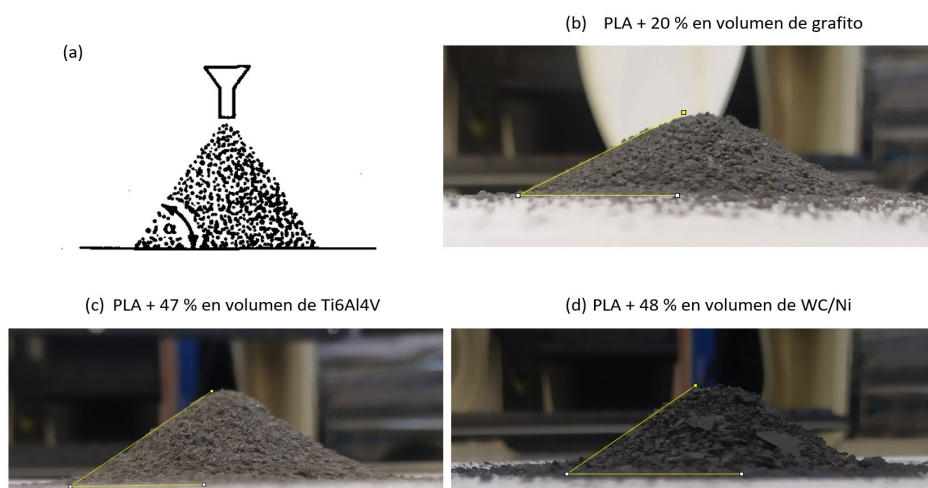


Figura 6.29. (a) metodología empleada para obtener el ángulo de reposo de los gránulos y (b) ejemplo de cómo se obtuvo el ángulo de reposo empleando el programa de análisis de imagen ImageJ. Las líneas amarillas forman el ángulo de reposo.

6.3.3 Metodología Carney (flujo de Carney y densidad aparente)

Para intentar prever la fluidez de los gránulos en la tolva se ha realizado el ensayo de determinación de flujo propuesto por el estándar ASTM B964-16 empleando un embudo de Carney (Carney Funnel) calibrado con un orificio de salida de $\varnothing 5$ mm; este método se ha seleccionado por encima del embudo de Hall (orificio de salida de $\varnothing 2,5$ mm) ya que se estimó que los gránulos estudiados no fluirán libremente a través de un embudo de Hall puesto que la geometría de los gránulos estudiados es relativamente irregular y puede presentar aglomeraciones y algunas partículas con tamaños superiores a 2,5 mm.

Para realizar el ensayo, se ha diseñado y fabricado, mediante impresión 3D, un embudo de Carney con las dimensiones dictadas por el estándar ASTM B964-16. Si bien es cierto que estos equipos se pueden comprar, su valor puede alcanzar los 500 €. Por lo tanto, para ahorrar costes y, si es necesario, realizar variaciones en el diseño del embudo de forma rápida y sencilla se ha optado por imprimir el embudo mediante impresión 3D. Se ha aprovechado la oportunidad para intentar diseñar el embudo de Carney con un diseño más compacto (siempre manteniendo las dimensiones dictadas por la norma) de forma que sea fácil de usar y transportar y pueda ser compartido en la red con cualquier persona que quiera imprimir un embudo similar. Otra razón por la que se ha decidido imprimir el embudo es por el hecho de que la tolva diseñada para el cabezal extrusor de husillo ha sido fabricada mediante la misma tecnología de impresión 3D, por lo que la rugosidad superficial de la tolva será similar a la del embudo de Carney impreso, lo que permitiría obtener resultados más realistas que si se emplea un embudo de Carney con una superficie más lisa.

El embudo se imprimió con Poliamida 12 mediante selective laser sintering. Una vez impreso se pintó con una pintura polimérica de color azul para protegerlo ante posibles desgastes. Una imagen del diseño del embudo realizado en Solid Works se presenta en la **Figura 6.30**. Los planos se adjuntan en el **Anexo A.2**. El resultado final tras imprimir el embudo se presenta en la **Figura 6.31**. El embudo de Carney diseñado está formado por 3 piezas: una pieza central en donde se encuentra el embudo y dos tapas, una superior en donde se cargan los gránulos y una inferior que recibe los gránulos tras pasar por el embudo (**Figura 6.30a**). En el diseño se puede observar que el embudo no tiene orificio de salida (**Figura 6.30c**), esto se debe al hecho de que el agujero se ha realizado tras la impresión de la pieza con una broca para asegurar que el tamaño del orificio presenta las tolerancias exigidas por la norma. El embudo se ha diseñado intentando imitar a un reloj de arena. La cantidad de gránulos seleccionada se carga en la tapa superior y se

cierra la pieza central con las dos tapas, seguidamente se gira el embudo y y, a través de las ventanillas centrales, se observan caer los gránulos midiendo el tiempo que tardan en caer todos los gránulos obteniendo un valor de flujo de Carney (s/g) (**Figura 6.32 y 6.33**).

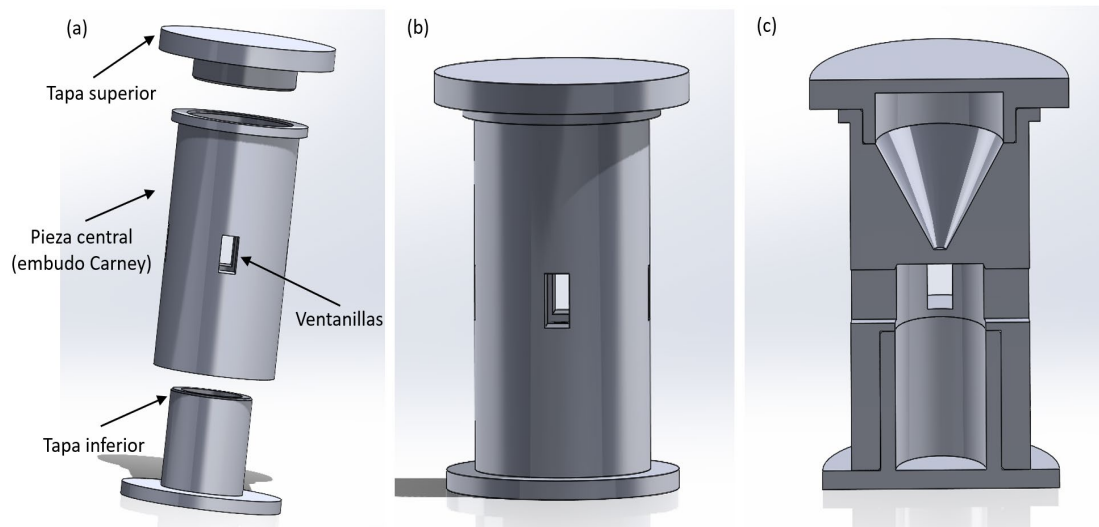


Figura 6.30. Diseño en SolidWorks del embudo de Carney fabricado. (a) ensamblaje con las tapas abiertas, (b) ensamblaje con las tapas cerradas y c) corte longitudinal del ensamblaje; el embudo no tiene orificio de salida ya que este se ha realizado, con posterioridad tras su impresión, con una broca.

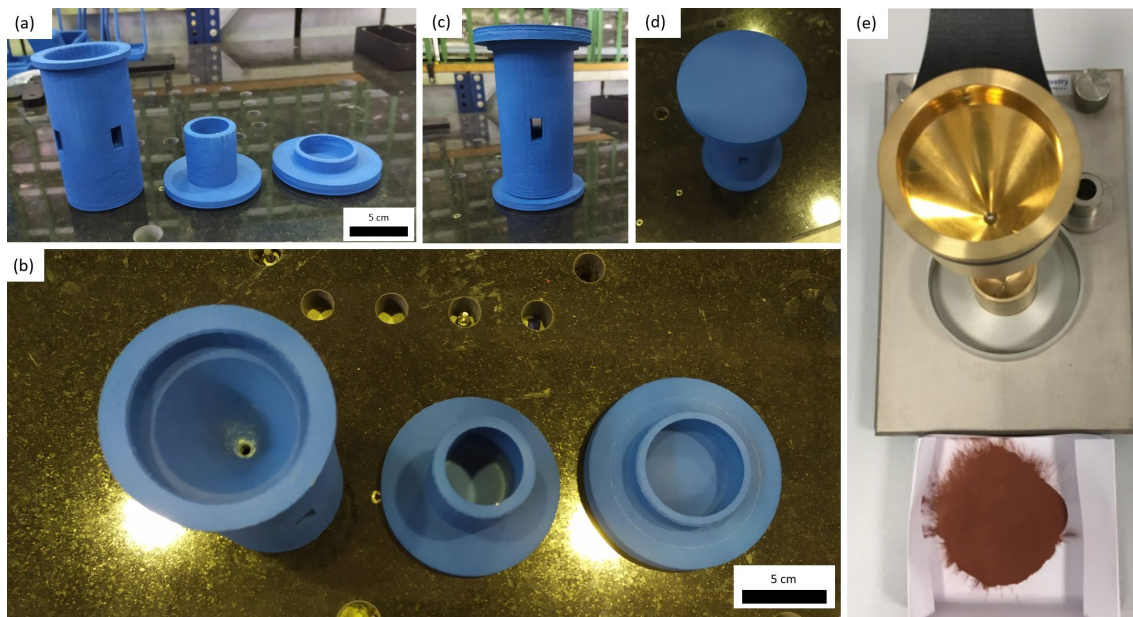


Figura 6.31. Fotografías de (a-b) embudo de Carney impreso en 3D desmontado en donde se pueden observar las 3 piezas que lo conforman. (c-d) embudo de Carney impreso en 3D montado y (e) embudo de Carney comercial con un polvo de referencia (polvo de color rojo).

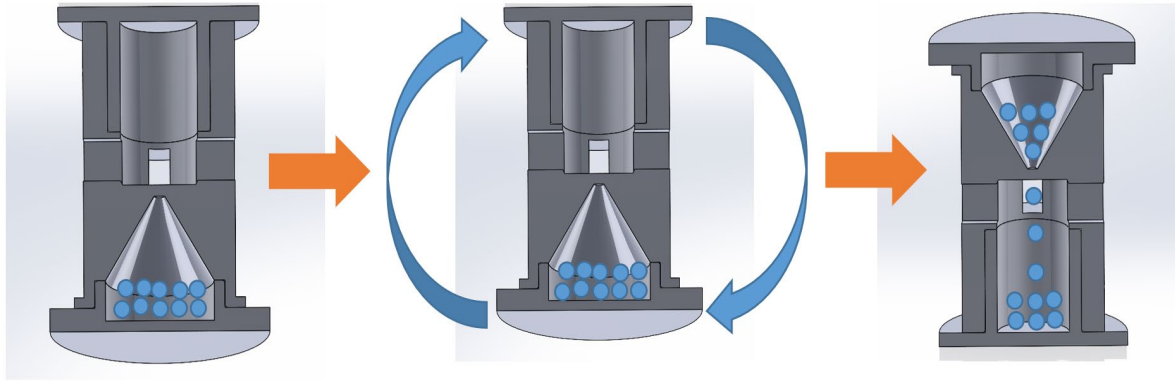


Figura 6.32. Esquema de la forma de uso del embudo de Carney diseñado. Las esferas azules representan los gránulos.

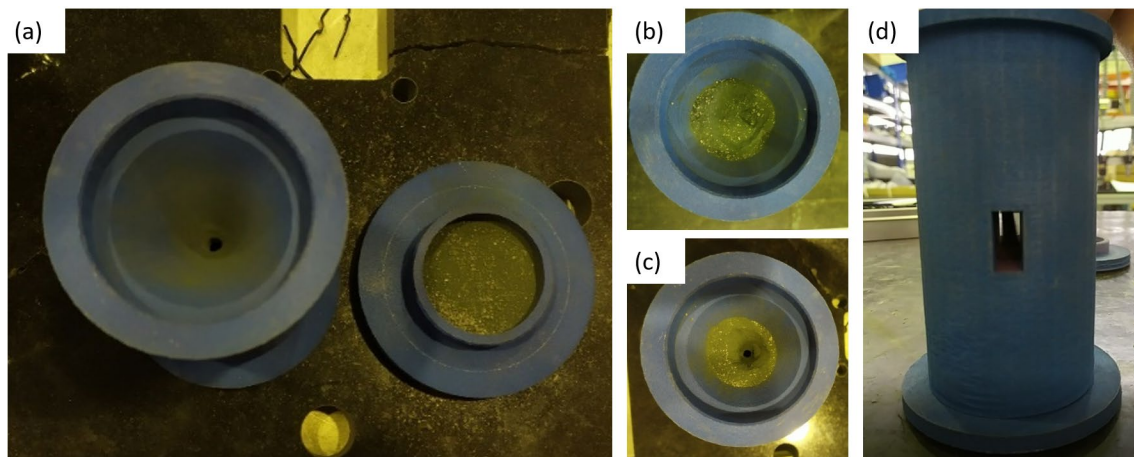


Figura 6.33. Fotografías del embudo de Carney impreso. (a) tapa superior cargada con un polvo de prueba, (b-c) polvo fluyendo por el embudo (se ha eliminado la tapa superior para permitir el visualizado de la caída del polvo). (d) polvo cayendo visto a través de una de las ventanillas.

Para obtener el flujo de Carney de los gránulos estudiados se empleó una cantidad de 10 g de material. Esta cantidad se seleccionó ya que algunos de estos gránulos presentan una densidad aparente muy baja, por lo que las dimensiones del embudo de Carney empleado no eran lo suficientemente grandes como para acoger mayores cantidades de material. Según el fabricante de los gránulos, el grado de cristalinidad del aglutinante puede afectar a la fluencia y, por lo tanto, recomienda secar los gránulos a 60 °C durante 10 minutos para garantizar que el grado de cristalinidad es el deseado. Es por esto que se decidió estudiar el flujo de Carney de los gránulos sin secar y tras su secado a 60 °C durante 10 minutos. Durante la realización del ensayo de Carney, en el caso de que los gránulos no fluyeran libremente a través del embudo, se aplicó

una agitación mediante golpes continuos con un martillo de goma intentando imitar la vibración que presentaría la tolva con un sistema de agitación. Por último, para estudiar la fiabilidad de los resultados obtenidos, el embudo de Carney impreso se comparó con un embudo de Carney comercial. Para esto se empleó un polvo de referencia del cual se conocía su flujo de Carney (obtenido con un embudo de Carney comercial, **Figura 6.31e**). La cantidad del polvo de referencia seleccionada para obtener su flujo de Carney usando el embudo impreso fue de 50 g. Esta cantidad se seleccionó ya que los valores del flujo de Carney del polvo referencia de los que se disponían habían sido obtenidos empleando esta cantidad (valores en s/50g).

Para la obtención de la densidad aparente, se han ido vertiendo los gránulos en el embudo de Carney impreso hasta que la tapa inferior (encargada de recoger los gránulos cuando caen por el embudo) se ha llenado por completo con los gránulos. Una vez llena, la tapa inferior se ha extraído del embudo y se ha pesado (antes de pesar la tapa se ha empleado una espátula con la hoja sostenida perpendicularmente a la parte superior de la tapa para nivelar los gránulos al ras, esta operación se ha realizado intentando aplicar la menor presión posible sobre los gránulos pues esto puede afectar a su densidad aparente). Dado a que se conoce tanto el peso de la tapa inferior vacía como su volumen, es posible conocer el peso de los gránulos que llenan la tapa y obtener su densidad aparente (g/cm^3). Se realizaron 3 medidas por cada tipo de gránulo.

6.3.4 Ensayo de fluencia en la tolva

Una vez impresa la tolva, se ha estudiado el flujo de los gránulos a través de esta. Para esto se ha tapado el orificio inferior de la tolva y se ha llenado con 100 g de material. Tras esto, se ha abierto el orificio interior y se ha observado que tipo de flujo han presentado los gránulos a través de la tolva. Esta metodología se ha realizado 3 veces por cada tipo de gránulo estudiado.

6.4 Software de impresión

6.4.1 PrusaSlicer

Para asignar los parámetros de impresión se ha empleado el software PrusaSlicer 2.4.2. PrusaSlicer permite configurar los parámetros de impresión con los que se quiere imprimir el

diseño 3D y exportar el resultado final en forma de archivo “G-Code”, que no es más que el modelo de la pieza original laminado en finas láminas y convertido en un conjunto de instrucciones de movimiento que puede entender y seguir la impresora 3D para fabricar la pieza [111]. PrusaSlicer dispone de 4 ventanas desde las cuales se pueden realizar la configuración de los parámetros de impresión de la pieza (**Figura 6.34**).

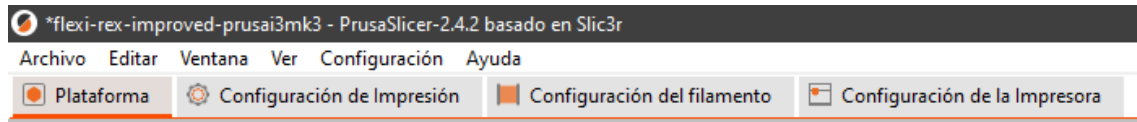


Figura 6.34. Las 4 ventanas principales de las que dispone PrusaSlicer.

La ventana “plataforma” (**Figura 6.35**) permite observar una recreación de la cama de impresión sobre dónde se imprimirá el objeto. En esta ventana, una vez cargado el diseño 3D en el programa, es posible indicar la posición y orientación con la que será impresa la pieza en la cama. En esta misma ventana también se pueden escoger configuraciones de impresión estándar (por ejemplo, existen unos parámetros de impresión ya optimizados para imprimir con ABS); en este caso, dado a que se van a imprimir materiales experimentales no existe la posibilidad de emplear parámetros de impresión ya optimizados.

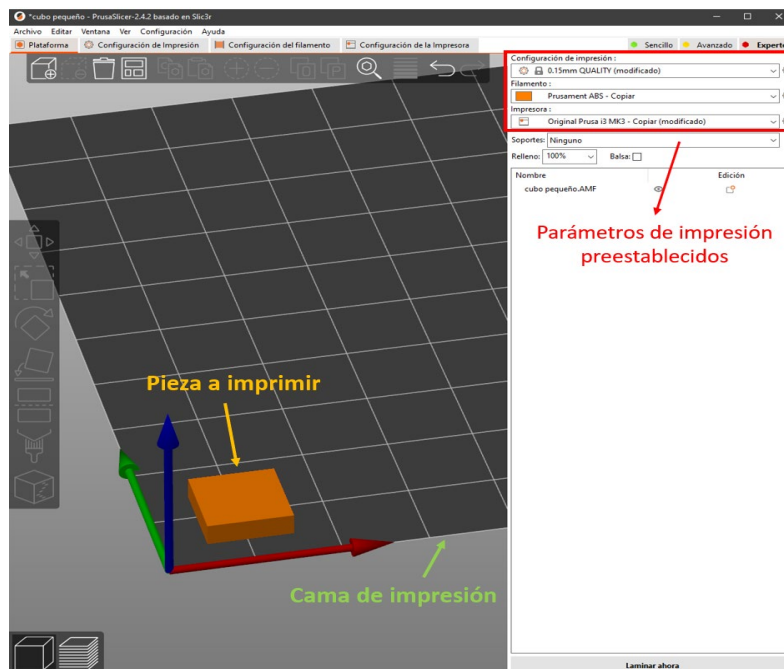


Figura 6.35. Imagen de la ventana “plataforma” del programa PrusaSlicer 2.4.2 en donde se puede ver la posición y orientación que va a ocupar la pieza en la cama una vez impresa.

Los parámetros que afectan a la posición y movimiento del cabezal extrusor se asignan en la ventana “Configuración de impresión” (**Figura 6.36**). Ejemplos de estos parámetros son: la altura de capa y el ancho del filamento extruido, la densidad y patrón de relleno, la superposición o la velocidad del cabezal extrusor, entre otros.

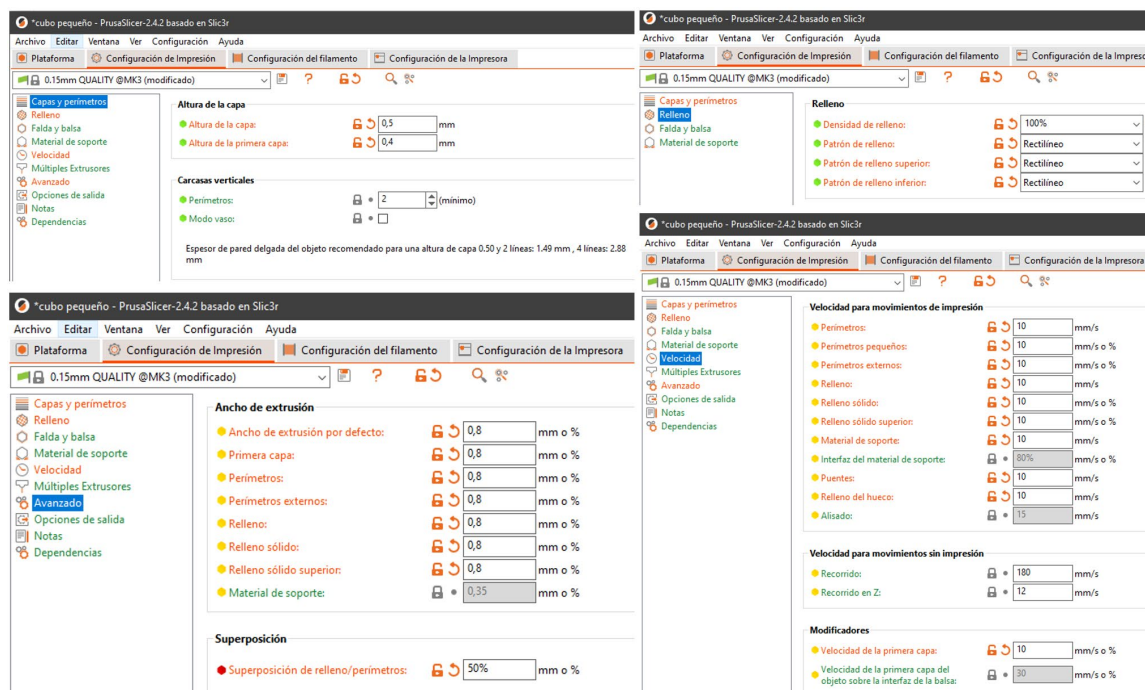


Figura 6.36. Imágenes de la ventana “configuración de impresión” del programa PrusaSlicer 2.4.2 en donde se muestran algunos de los parámetros más relevantes para la impresión de las piezas que se pueden seleccionar en esta ventana.

Los parámetros que afectan a la materia prima se asignan en la ventana “configuración del filamento” (**Figura 6.37**). Tal y como se ha expuesto en el **Apartado 5**, PrusaSlicer está pensado para impresoras de filamento fundido en donde se emplea la materia prima en forma de filamento. Por lo tanto, en el caso de este trabajo, el parámetro llamado “diámetro” (utilizado para indicar el diámetro del filamento con el que se está alimentando al extrusor, **Figura 6.37**, marcado con un recuadro rojo), no tiene ningún sentido físico. A pesar de esto, PrusaSlicer obliga a asignar un valor a este parámetro, por lo que se ha de considerar que el valor de diámetro seleccionado tendrá un efecto sobre la velocidad de giro del husillo tal y como se demuestra en la **Ecuación 5.9**. En esta misma ventana también se asigna la temperatura de la cama de impresión y de la boquilla, el multiplicador de extrusión M221, o los ajustes de los diferentes ventiladores del cabezal, entre otros parámetros.

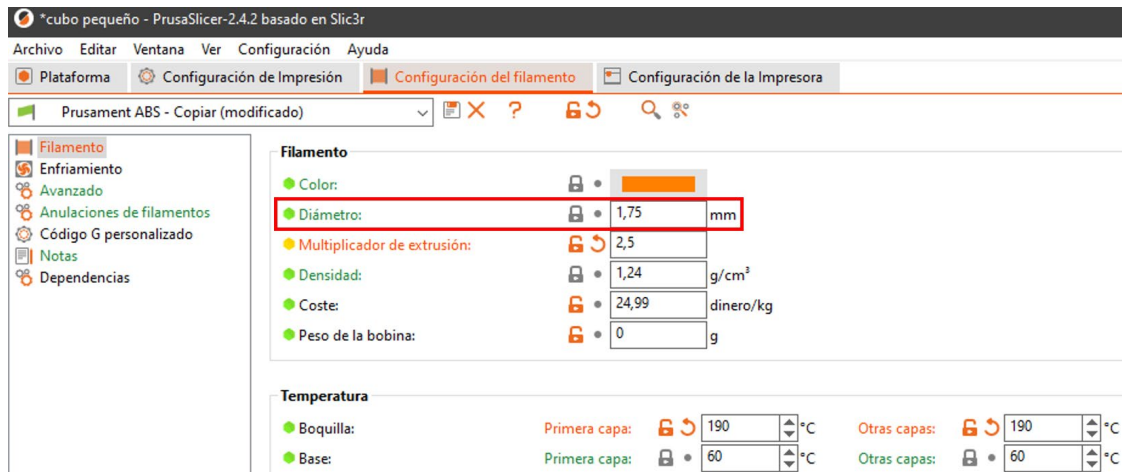


Figura 6.37. Imágenes de la ventana “configuración del filamento” del programa PrusaSlicer 2.4.2 en donde se muestran algunos de los parámetros más relevantes para la impresión de las piezas que se pueden seleccionar en esta ventana. El parámetro “diámetro” se señala con un recuadro rojo.

Finalmente, las limitaciones de la impresora se asignan en la ventana “configuración de la impresora” (**Figura 6.38**). Ejemplos de limitaciones son: la geometría y tamaño de la cama de impresión, la velocidad y aceleración máxima del cabezal extrusor, o las dimensiones de la boquilla. En esta misma ventana también se pueden realizar cambios manuales al G-Code que creará el Programa PrusaSlicer tras seleccionar todos los parámetros de impresión.

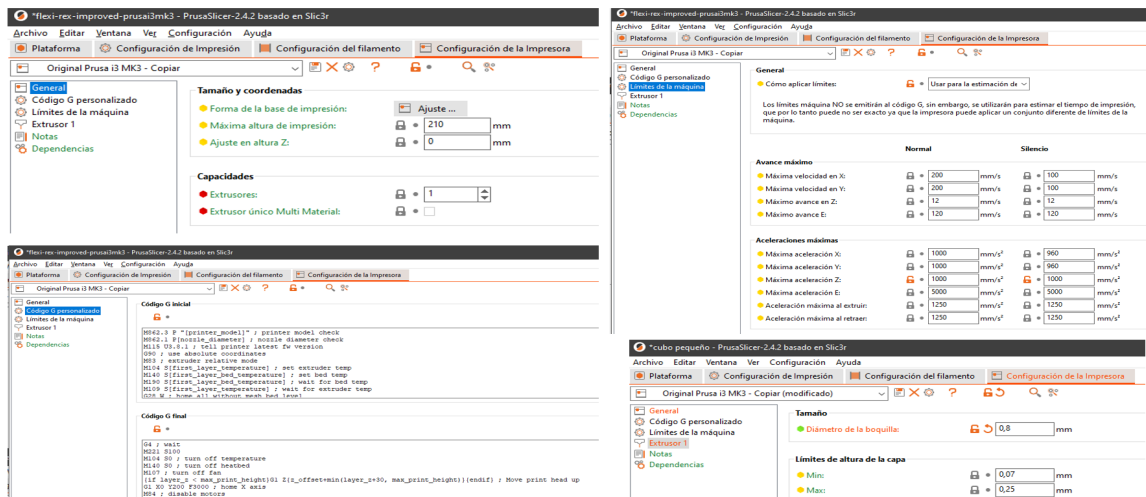


Figura 6.38. Imágenes de la ventana “configuración de la impresora” del programa PrusaSlicer 2.4.2 en donde se muestran algunos de los parámetros más relevantes para la impresión de las piezas que se pueden seleccionar en esta ventana.

Tras asignar los parámetros de impresión deseados y seleccionar “laminar ahora” en la ventana de “plataforma” (**Figura 6.35**, zona inferior derecha), se muestra una recreación de cómo será

impreso por la impresora el diseño 3D, mostrando las diferentes capas, el recorrido que realizará el cabezal extrusor para imprimir la pieza, la cantidad de material empleado y el tiempo de impresión estimado (**Figura 6.39**).

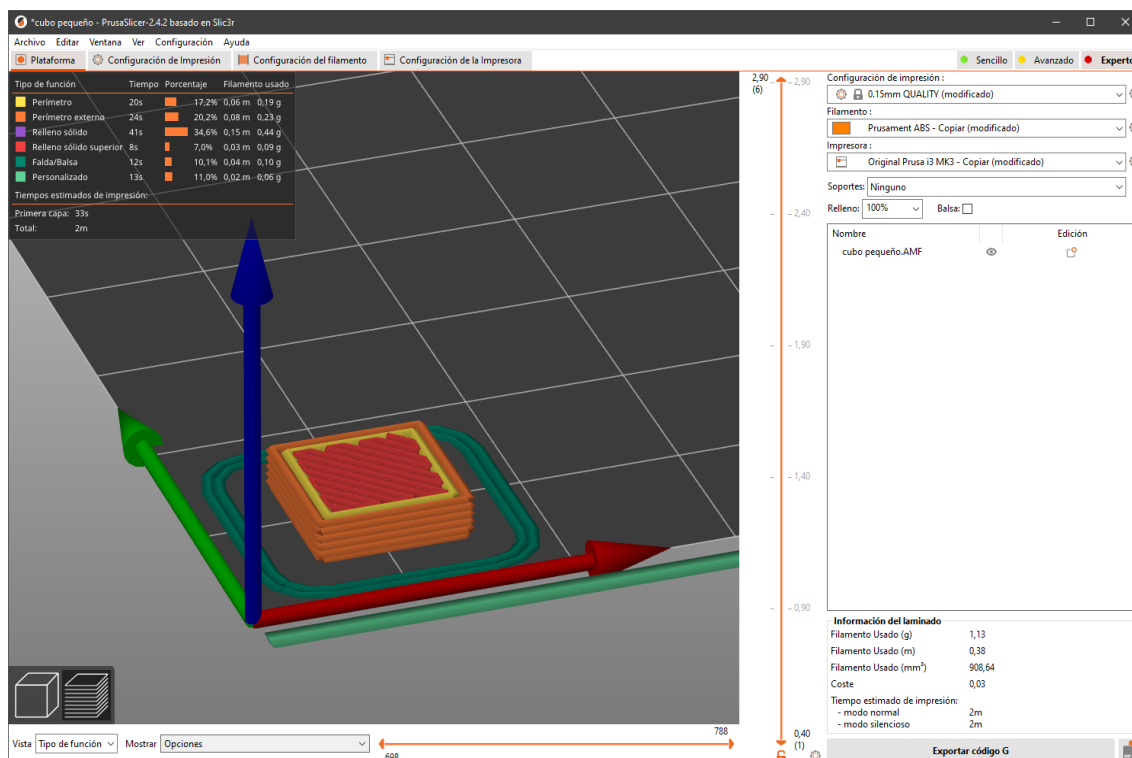


Figura 6.39. Imagen de la ventana “plataforma” del programa PrusaSlicer 2.4.2 tras añadir los diferentes parámetros de impresión y pulsar la opción de “laminar ahora”, en donde se puede observar una simulación de cómo se va a imprimir la pieza (número de capas, recorrido del cabezal, espesor del filamento...) junto con el tiempo de impresión estimado.

Finalmente, cuando se está satisfecho con la forma en la que se imprimirá la pieza, se selecciona “Exportar código G” en la esquina inferior derecha de la ventana “plataforma” (**Figura 6.39**) para generar el archivo G-Code (**Figura 6.40**). Este archivo es editable, por lo que es posible añadir o quitar líneas de instrucción para personalizar capa a capa el proceso de impresión de la pieza (existen más de 500 tipos de instrucciones diferentes [112]). Una de estas líneas de instrucción es la que permite asignar el multiplicador de extrusión M221. Tal y como se ha explicado en los **Apartados 5.4** y **5.5**, este multiplicador de extrusión es de extremo interés pues permite controlar la velocidad de giro del husillo y por lo tanto el flujo de material que está siendo extruido por la boquilla. El multiplicador se añade mediante la línea de instrucción “M221 SX” donde X es el multiplicador deseado (el valor X se introduce de forma porcentual, por ejemplo, un valor M221 S150 quiere decir que se aumentará el flujo de material extruido en un 150 %).

En la **Figura 6.40** se muestra un fragmento de G-Code en donde se pueden observar las diferentes líneas de instrucción que seguirá la impresora 3D para imprimir la pieza; las líneas de instrucción introducidas manualmente para asignar un multiplicador de extrusión a la primera capa y otro diferente al resto de capas superiores se encuentran marcadas con un recuadro rojo y azul respectivamente (en este caso, la pieza se imprimirá un multiplicador de extrusión del 1000 % en la primera capa y del 400 % en el resto de capas).

```
; generated by Slic3r Prusa Edition 1.41.3+win64 on 2020-02-17 at 14:55:17
;
; external perimeters extrusion width = 0.50mm
; perimeters extrusion width = 0.50mm
; infill extrusion width = 0.50mm
; solid infill extrusion width = 0.50mm
; top infill extrusion width = 0.50mm
; first layer extrusion width = 0.50mm

M73 P0 R4
M73 Q0 S4
M201 X1000 Y1000 Z1000 E5000 ; sets maximum accelerations, mm/sec^2
M203 X200 Y200 Z12 E120 ; sets maximum feedrates, mm/sec
M204 P1250 R1250 T1250 ; sets acceleration (P, T) and retract acceleration (R), mm/sec^2
M205 X8.00 Y8.00 Z0.40 E1.50 ; sets the jerk limits, mm/sec
M205 S0 T0 ; sets the minimum extruding and travel feed rate, mm/sec
M107

M221 S1000

M115 U3.5.1 ; tell printer latest fw version
M83 ; extruder relative mode
M104 S180 ; set extruder temp
M140 S105 ; set bed temp
M190 S105 ; wait for bed temp
M109 S180 ; wait for extruder temp
G92 E0.0

M900 K30; Filament gcode
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; use relative distances for extrusion

G1 X25.862 Y12.758 E0.40982
G1 X25.911 Y13.390 E0.40982
G1 X25.836 Y14.019 E0.40982
G1 X25.637 Y14.626 E0.41267
G1 X22.377 Y20.299 E4.23129
G1 X21.842 Y20.919 E0.52961
G1 X21.164 Y21.387 E0.53245
G1 X20.464 Y21.651 E0.48402
G1 X19.717 Y21.747 E0.48687
G1 X13.563 Y21.745 E3.97919
G1 X12.957 Y21.664 E0.39553
G1 X12.381 Y21.473 E0.39267
G1 X11.621 Y21.002 E0.57797
G1 X11.019 Y20.342 E0.57797
G1 X7.787 Y14.749 E4.17701
G1 X7.548 Y14.091 E0.45264
G1 X7.456 Y13.393 E0.45550
G1 X7.517 Y12.691 E0.45550
G1 X7.729 Y12.019 E0.45550
G1 X10.971 Y6.376 E4.20837
G1 X11.393 Y5.862 E0.42982
; PURGING FINISHED
G1 X12.558 Y16.070 F3600.000
G1 F300
G1 X10.972 Y13.322 E2.05141
G1 X13.828 Y8.376 E3.69314
G1 X19.539 Y8.376 E3.69314
G1 X22.395 Y13.322 E3.69314
G1 X19.539 Y18.269 E3.69314
G1 X13.828 Y18.269 E3.69314
G1 X12.596 Y16.135 E1.59323
G1 X13.718 Y18.033 F3600.000
G1 F300
G1 X19.411 Y18.033 E3.79391
G1 X19.683 Y17.562 E0.36249
G1 X13.684 Y17.562 E3.99813

G1 X21.859 Y12.851 E0.36246
G1 X11.508 Y12.851 E6.89810
G1 X11.780 Y12.380 E0.36249
G1 X21.587 Y12.380 E6.53562
G1 X21.315 Y11.909 E0.36249
G1 X12.052 Y11.909 E6.17313
G1 X12.324 Y11.438 E0.36249
G1 X21.043 Y11.438 E5.81064
G1 X20.771 Y10.967 E0.36249
G1 X12.596 Y10.967 E5.44815
G1 X12.868 Y10.496 E0.36249
G1 X20.499 Y10.496 E5.08566
G1 X20.227 Y10.025 E0.36249
G1 X13.140 Y10.025 E4.72317
G1 X13.412 Y9.554 E0.36249
G1 X19.955 Y9.554 E4.36068
G1 X19.683 Y9.083 E0.36249
G1 X13.684 Y9.083 E3.99819
G1 X13.956 Y8.612 E0.36249
G1 X19.649 Y8.612 E3.79398
M106 S255
; BEFORE_LAYER_CHANGE
G92 E0.0

M221 S400

;0.7

G1 Z0.700 F3600.000
; AFTER_LAYER_CHANGE
;0.7
; PURGING FINISHED
G1 X14.737 Y8.376
G1 F450
```

Figura 6.40. Fragmento de G-Code con las instrucciones que seguirá la impresora para imprimir la pieza. Las instrucciones que permiten asignar un multiplicador de extrusión a la primera capa y otro diferente al resto de capas se encuentran marcadas con un recuadro rojo y azul respectivamente.

6.4.2 Duet Web control

Una vez se tiene listo el archivo G-Code con todas las instrucciones deseadas, este se ha de introducir en la impresora 3D para que esta lo pueda leer. Existen varias formas de introducir el G-Code en la impresora ya sea mediante una tarjeta SD o empleando diferentes tipos de programas “host” que se encargan de controlar la impresora y transmitirle el archivo G-Code para que esta pueda leerlo e imprimir la pieza. En el caso de este trabajo se ha empleado el programa de host “Duet Web Control V3”. Para poder vincular la impresora con este programa basta con instalar, mediante una tarjeta SD, el sistema operativo de Duet en la placa de control encargada de controlar la impresora (**Figura 6.41a**) y adjudicar un valor IP a la impresora 3D en

el archivo config.g del sistema operativo (**Figura 6.41b**). En este mismo archivo se realiza la configuración y calibración de todos los elementos de la impresora (cabezales, motores, endstops...) y se asignan sus limitaciones (como, por ejemplo, la máxima velocidad de movimiento de los cabezales o la temperatura máxima de impresión). Una vez asignado el valor de IP a la impresora, se puede conectar un ordenador a la impresora mediante un cable ethernet y colocar la dirección IP de la impresora en el buscador de internet para acceder al panel de control “Duet Web Control” (**Figura 6.42**). Desde este panel se puede controlar la impresora, siendo posible realizar alteraciones en su archivo config.g, monitorear su estatus (posición y velocidad de los cabezales, temperaturas, estado de los ventiladores...) y enviarle instrucciones de G-Code.

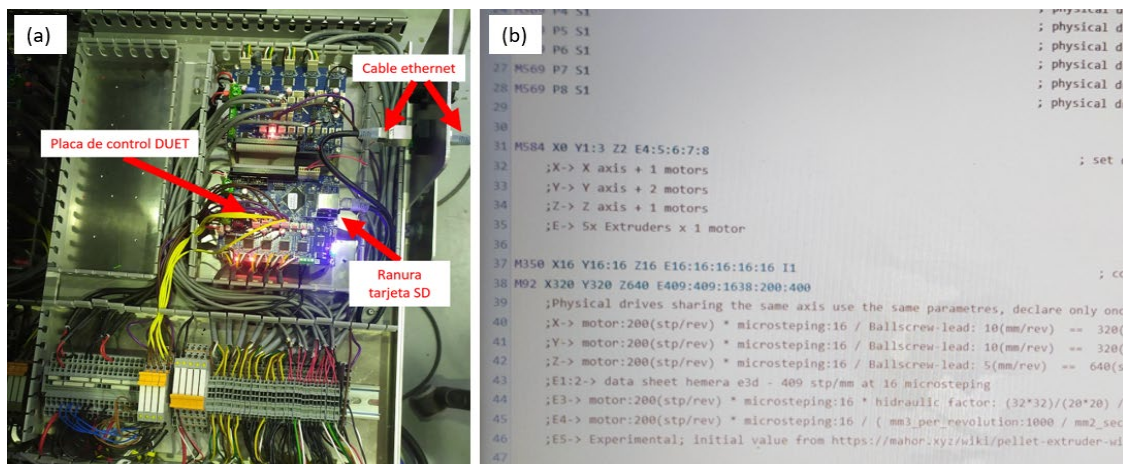


Figura 6.41. Fotografía de (a) la placa de control DUET de la impresora AIMPLAS y (b) archivo config.g del sistema operativo de la placa de control.

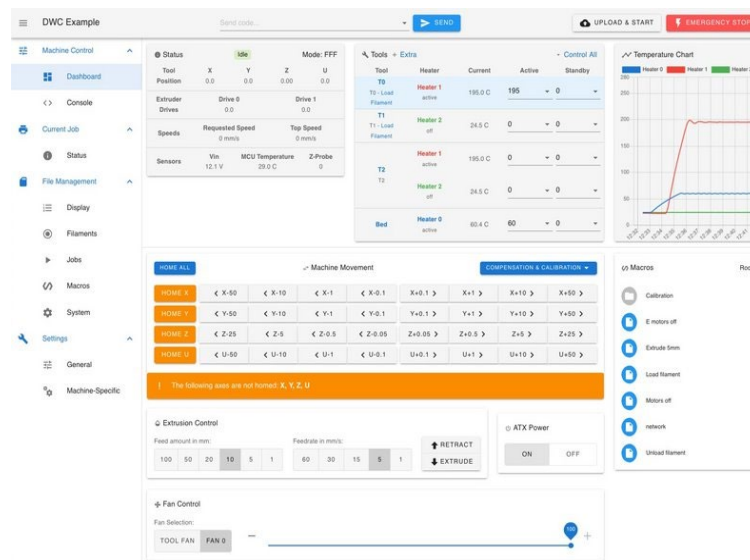


Figura 6.42. Imagen del programa de host “Duet Web Control” usado para controlar la impresora 3D.

6.5 Selección de los parámetros de impresión

6.5.1 Obtención del flujo de extrusión de la materia prima en forma de filamentos

Para estudiar el efecto de la temperatura en el flujo de material extruido, se han ensayado 4 tipos diferentes de materiales en forma de filamento: PLA y ABS (ambos sin carga inorgánica), PLA + 20 % en volumen de hidroxiapatita y PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V (**Figura 6.43**). Los filamentos de PLA y ABS sin carga inorgánica se han seleccionado ya que son los materiales más comúnmente empleados como materia prima en la impresión 3D basada en la extrusión, por otro lado, los filamentos de PLA + carga inorgánica se han seleccionado ya que, de los filamentos que se disponían, estos son los que presentan una composición de la matriz polimérica y cantidad de carga inorgánica más similar a los gránulos a estudiar. Se cree necesario aclarar que, si bien es cierto que el objetivo final de este trabajo es emplear la materia prima en forma de gránulos, realizar estudios de flujo empleando una extrusora de gránulos es bastante más complejo que mediante el empleo de una extrusora de filamentos ya que existen una mayor cantidad de parámetros que hay que tener en consideración. Las dos razones por las que se ha decidido iniciar los ensayos de flujo estudiando la materia prima en forma de filamento son: 1- los filamentos de PLA cargados con carga inorgánica han sido elaborados por el mismo fabricante que los gránulos (Colfeed) mediante un proceso de fabricación y composición similares, lo que permitiría hacerse una idea previa de cómo puede ser el comportamiento de este tipo de materiales al ser extruidos. 2- El estudio del material en forma de filamentos permite comparar, de forma relativamente sencilla, su comportamiento con los materiales más comúnmente empleados en impresión 3D basada en la extrusión: PLA y ABS.

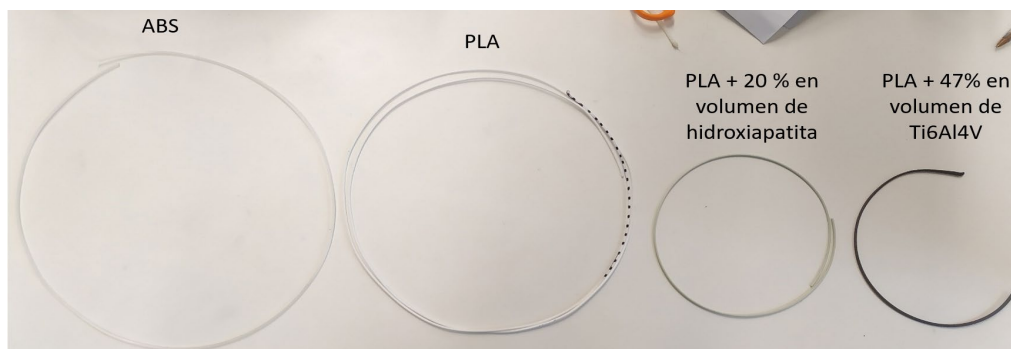


Figura 6.43. Imagen de los 4 filamentos estudiados. De izquierda a derecha: ABS, PLA, PLA + 20 % en volumen de hidroxiapatita y PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V.

Normalmente, el cálculo del flujo de material extruido lo realiza automáticamente la impresora 3D en función del diámetro del filamento empleado como materia prima, el diámetro de la boquilla y los pasos/mm del motor extrusor que empuja el filamento [20]. En nuestro caso, lamentablemente, la longitud de los filamentos de PLA + carga inorgánica suministrados por el fabricante no era la suficiente como para poder introducir los filamentos en el sistema de alimentación que alimenta al cabezal extrusor, por lo que no ha sido posible obtener el flujo de material de forma automática. Esto ha llevado a que se haya tenido que realizar el ensayo de flujo de forma manual. Para esto se ha empleado el montaje mostrado en las **Figuras 6.44 y 6.45**.

El montaje consiste en una impresora 3D de modelado por deposición fundida (diseñada para emplear la materia prima en forma de filamentos) a la cual se le ha desinstalado el sistema automático de alimentación, de forma que el filamento pueda ser alimentado manualmente al cabezal de extrusión (**Figura 6.45e-g**). El cabezal de extrusión se encuentra instalado sobre una guía vertical con resorte (**Figura 6.45c**), esto hace que, al aplicar una fuerza para alimentar el filamento al cabezal de extrusión, el cabezal descienda hasta una posición determinada en función de la fuerza que se ejerza y recupere la posición inicial cuando se deje de aplicar la fuerza (**Figura 6.45d**). La guía se ha atado a un dinamómetro mediante un cable de teflón para medir la fuerza que se está aplicando al alimentar el filamento al cabezal de extrusión (**Figura 6.45b**). De esta forma, de acuerdo con la ley de Hooke, es posible relacionar la altura que desciende la guía con la fuerza que se está ejerciendo para extruir el filamento. Para realizar el ensayo se seleccionó una fuerza de 8 N y se marcó la altura equivalente en la guía, de esta forma, al alimentar manualmente el filamento en el cabezal de extrusión con la fuerza necesaria para descender la guía hasta la posición indicada, se aseguraba que la fuerza ejercida era la deseada. Si bien es cierto que existen varios factores que pueden alterar la calibración de esta relación altura guía/fuerza (como, por ejemplo, aflojamiento/desgaste de la cuerda de teflón que une la guía con el dinamómetro), se realizaron recalibraciones tras cada ensayo para garantizar que la relación altura guía/fuerza fuera la deseada.

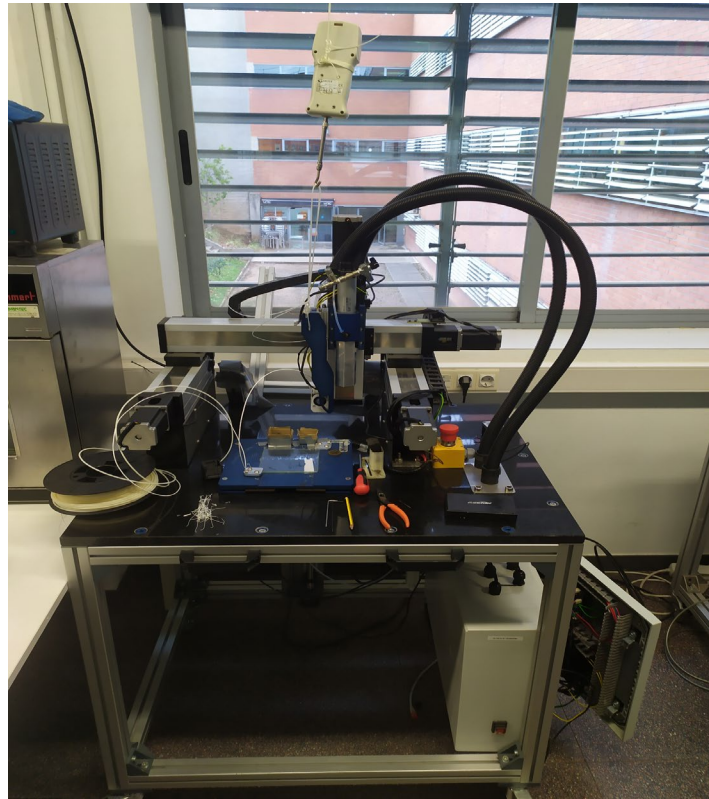


Figura 6.44. Fotografía del montaje empleado para realizar el estudio de flujo en función de la temperatura para los diferentes tipos de filamento.

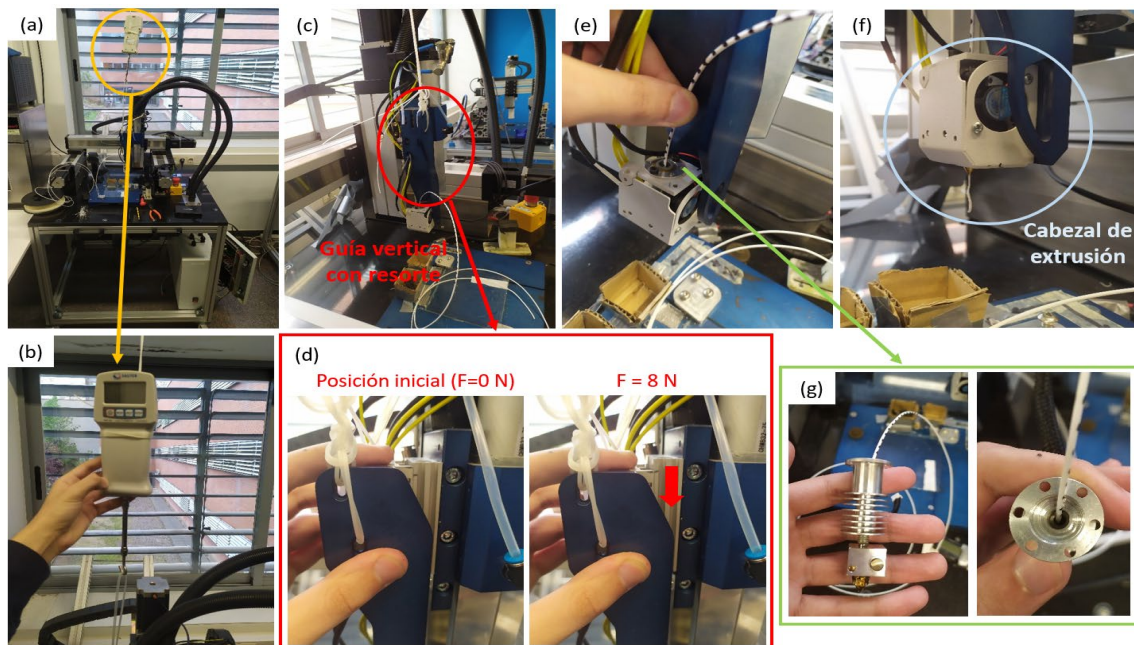


Figura 6.45. Fotografías del montaje empleado para realizar el estudio de flujo de los diferentes filamentos. a) montaje general, b) dinamómetro, c) guía vertical con resorte, d) diferentes posiciones en las que se puede encontrar la guía en función de la fuerza con la que se alimenta el filamento en el cabezal de extrusión, e) filamento siendo extruido manualmente en el cabezal de extrusión, f) cabezal de extrusión en donde se puede observar filamento siendo extruido por la boquilla, g) interior del cabezal de extrusión.

El diámetro y otras características de los filamentos estudiados se presentan en la **Tabla 7.6**. La boquilla empleada en el cabezal de extrusión ha sido de 1 mm de diámetro. Los filamentos se marcaron cada 5 mm (**Figura 6.45e**, marcas negras en el filamento) y se extruyeron a diferentes temperaturas con una fuerza constante de 8 N midiendo el tiempo que se requería para alimentar 5 mm de filamento al cabezal de extrusión; se realizaron un mínimo de 4 medidas para cada temperatura. De esta forma, conociendo el diámetro de los filamentos es posible obtener el volumen de material que se está alimentando y, suponiendo el cumplimiento del principio de conservación de la tasa de flujo volumétrico, es posible obtener, mediante la **Ecuación 6.1**, una aproximación del flujo de material que está siendo extruido, o, en otras palabras, el volumen de material que está siendo extruido en función del tiempo (mm³/s).

$$\text{Flujo de material extruido} = \frac{\pi \cdot 5 \cdot (r_{\text{filamento}})^2}{t_{5mm}} \quad (\text{Ec.6.1})$$

Donde $r_{\text{filamento}}$ es el radio, en mm, del filamento que se está alimentando y t_{5mm} es el tiempo, en segundos, para alimentar 5 mm de filamento. El flujo de material extruido se mide en mm³/s.

Si bien es cierto que otra metodología que podría ser más precisa hubiera sido introducir el filamento con una fuerza y tiempo constante y medir la masa del filamento extruido en ese tiempo (sería algo similar a un ensayo MFI empleado en polímeros), no se disponía de suficiente filamento de PLA + carga inorgánica para realizar el ensayo de esta forma (la balanza empleada requiere de una masa mínima para poder medir con precisión el filamento extruido, y puesto que los filamentos tienen una densidad baja, esto implicaría extruir una elevada cantidad de material por cada medida).

6.5.2 Obtención del flujo de extrusión de la materia prima en forma de gránulo

Uno de los principales indicativos de que se puede obtener una impresión exitosa con el cabezal extrusor es estudiar si el flujo de material que se está extruyendo es constante. Tal y como se ha demostrado en el **Apartado 6.5.1**, la obtención del flujo de material que se está extruyendo

es una tarea relativamente sencilla cuando se emplea un cabezal de extrusión de filamento convencional en donde se usa filamento como materia prima. Lamentablemente, el cálculo del flujo extruido se complica considerablemente al emplear un cabezal de husillo en donde la materia prima se encuentra en forma de pellets/gránulos puesto que se han de considerar una mayor cantidad de parámetros. Una forma sencilla y eficaz de estudiar si el flujo es constante es extruir filamentos a una temperatura, shear rate y número de revoluciones del husillo constantes y pesar los filamentos. Si el peso del filamento extruido es el mismo o muy similar se puede suponer que el flujo de material extruido es constante y por lo tanto no existen, entre otros, ni atascos ni problemas de alimentación.

Dado a que el componente principal de los gránulos estudiados es PLA y el cabezal extrusor de husillo empleado está diseñado para ser usado con pellets poliméricos con un tamaño de 3 a 5 mm (preferiblemente esféricos), se han adquirido pellets de PLA puro con estas características para comparar el flujo de material al extruir estos pellets y los gránulos (**Figura 6.46**); los pellets han sido suministrados por Smart Materials 3D el cual no ha aportado información sobre el grado del material.

Para el ensayo de flujo se han extruido 100 mm de material con una velocidad de giro del husillo constante (shear rate constante) a diferentes temperaturas. Se han realizado 5 mediciones por cada temperatura y material. Además, se observaron las características del filamento extruido (dimensiones, geometría, coloración...) para detectar posibles defectos (**Figura 6.47**).

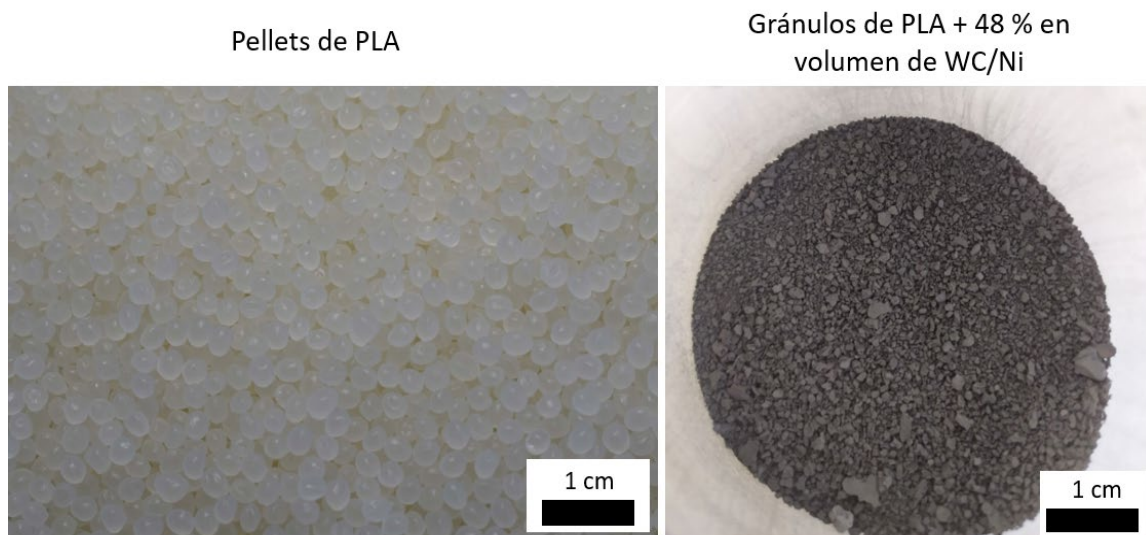


Figura 6.46. Fotografías de los pellets de PLA (izquierda) y los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni (derecha).

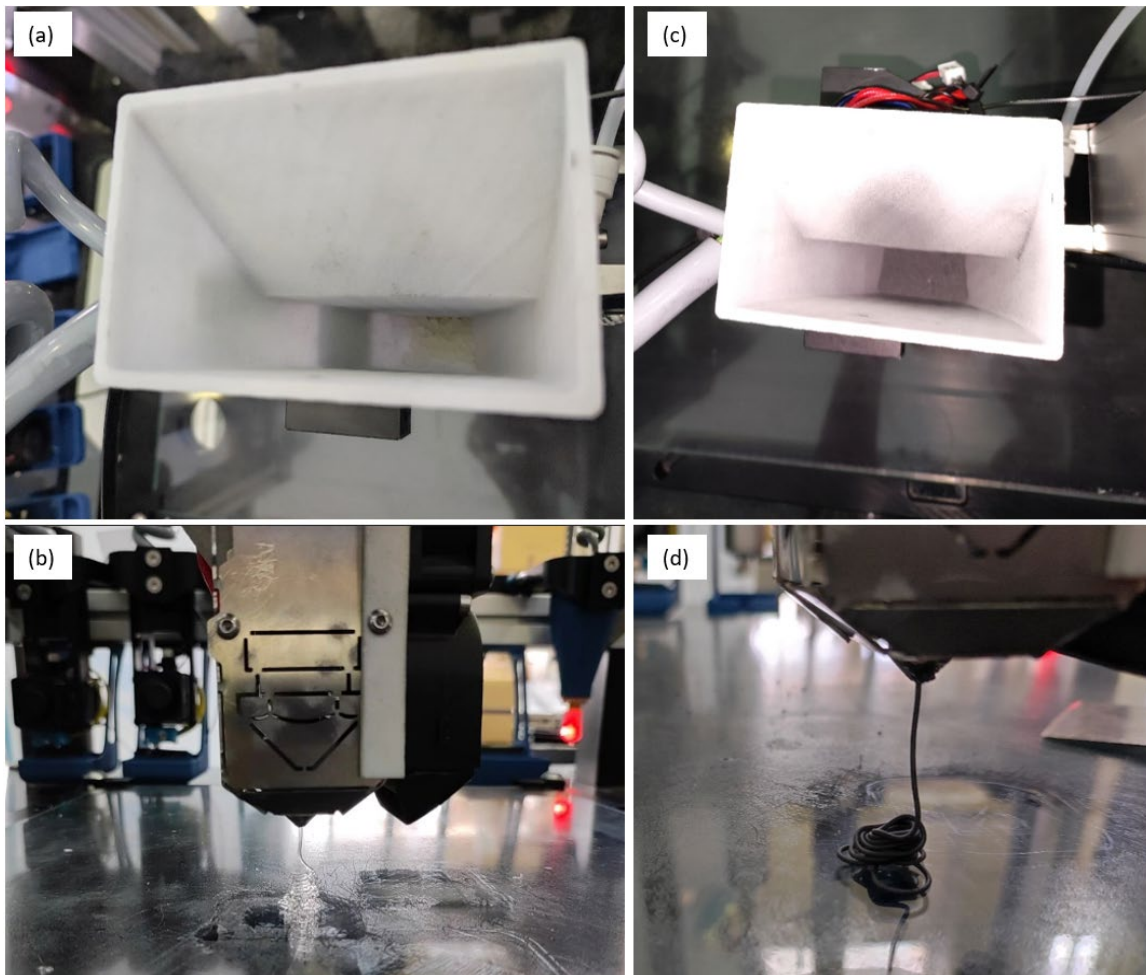


Figura 6.47. Imágenes de (a-b) pellets de PLA puro en la tolva y siendo extruidos y (c-d) gránulos de WC/Ni en la tolva y siendo extruidos.

6.5.3 Dimensiones y parámetros de impresión de las muestras

Para el estudio de los parámetros de impresión, se han impreso prismas cuadrangulares de 10 x 10 x 3 mm (**Figura 6.48**). Se ha seleccionado esta geometría y dimensiones debido a que es una pieza relativamente pequeña (lo que permite ahorrar material) y fácil de medir con un pie de rey para realizar el estudio de sus dimensiones. Las muestras se han impreso empleando, como materia prima, pellets de PLA puro y los diferentes gránulos de PLA + carga inorgánica estudiados con el objetivo de comparar los resultados obtenidos al imprimir las muestras usando la materia prima para la que está diseñada el cabezal extrusor (pellets de PLA puro) con los resultados obtenidos al emplear los gránulos.

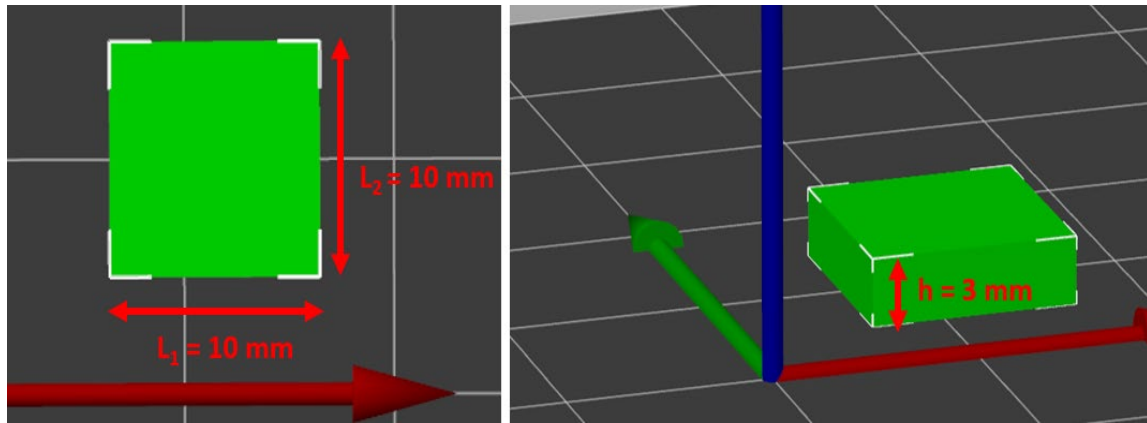


Figura 6.48. Geometría y dimensiones de las muestras impresas.

Para la impresión de las piezas se ha empleado una boquilla de 0,8 mm ya que este tamaño es lo suficientemente grande como para reducir considerablemente los atascos de material y obtener una precisión dimensional aceptable (véase **Apartado 7.2.2** para más información). El flujo irregular obtenido al extruir los gránulos ha dificultado considerablemente el estudio y la optimización de los parámetros de impresión, aún y así, tras prueba y error se han seleccionado los parámetros de impresión de la **Tabla 6.5** para la impresión de las muestras pues son los que han dado unos mejores resultados (para más detalles sobre la problemática del flujo irregular y la obtención de los parámetros de impresión véase **Apartado 7.2**). En la **Figura 6.49a** se presenta una simulación realizada por PrusaSlicer de cómo se va a imprimir la muestra diseñada empleando los parámetros de impresión seleccionados. En esta misma figura se pueden observar unos contornos de color verde oscuro alrededor de la primera capa, esto se conoce como skirt o falda y se realiza para asegurar la purga del extrusor y la nivelación de la boquilla respecto de la cama antes de empezar a imprimir la pieza, evitando así posibles errores. En la **Figura 6.49b** se presenta una fotografía realizada durante la impresión de una de las muestras. Para realizar el cambio de material, el cabezal extrusor se ha limpiado extruyendo PLA puro hasta que el filamento extruido pasara de un color opaco oscuro (color de los gránulos) a un color completamente transparente (color del PLA puro), lo que indica que ya no queda material residual en el barril.

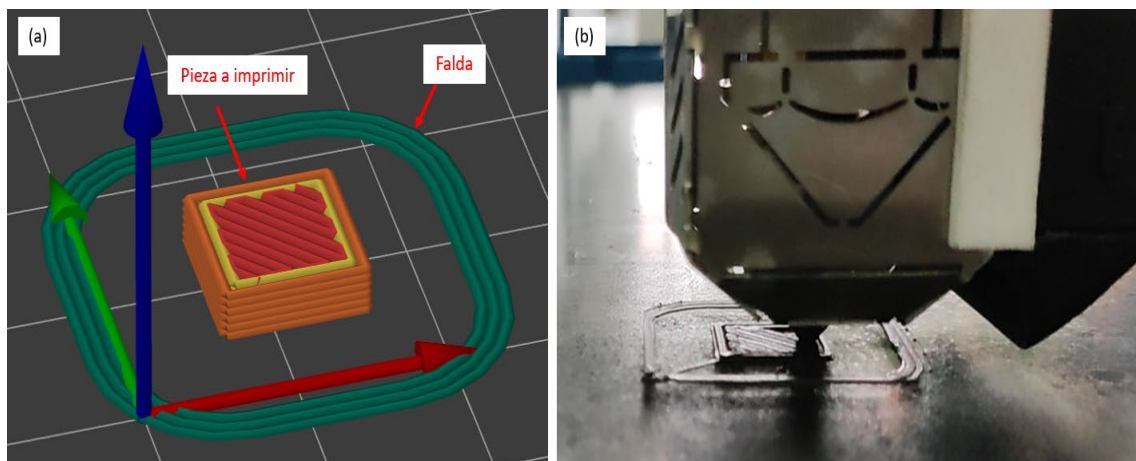


Figura 6.49. (a) Simulación realizada por PrusaSlicer de la forma en la que se va a imprimir la pieza empleando los parámetros de impresión propuestos en la Tabla 6.5. Naranja: pared externa, amarillo: pared interna, rojo: patrón de llenado, y verde oscuro: falda. (b) Pieza siendo impresa empleando los gránulos como materia prima.

Tabla 6.5. Parámetros de impresión propuestos para la impresión de piezas empleando los gránulos suministrados por Colfeed y el cabezal extrusor de husillo de Tumaker modificado. Una explicación en detalle sobre el significado de cada uno de estos parámetros se puede encontrar en el Apartado 5.

Diámetro de la boquilla (D_b) (mm)	T. en el calefactor superior ($^{\circ}\text{C}$)	T. en la boquilla ($^{\circ}\text{C}$)	T. en la cama de impresión ($^{\circ}\text{C}$)	Altura primera capa (h) (mm)	Altura resto de capas (h) (mm)
0,8	170	190	60	0,4	0,5
Anchura de capa (w) (mm)	Diámetro (D)	Superposición (%)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad del cabezal (V_{cabezal}) (mm/s)
0,8	1,75	50	Rectilíneo $0^{\circ}/90^{\circ}$	100	10
Multiplicador de extrusión (M221)	Velocidad giro husillo (rpm)	Relación $V_{\text{Cabezal}}/V_{\text{Extrusión}}$	Tiempo estimado impresión pieza (min)		
2,5	30	0,4	2 min		

6.6 Eliminación del aglutinante y sinterización de las muestras impresas

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 2.4.6**, la eliminación del aglutinante normalmente se realiza en dos etapas: una primera etapa en donde se elimina el componente principal del aglutinante (normalmente mediante un solvente) y una segunda etapa en donde se elimina térmicamente el aglutinante restante. El fabricante que ha suministrado los gránulos empleados en este estudio afirma que su material no requiere de una eliminación previa del componente principal del aglutinante mediante solvente y que la eliminación de todo el aglutinante se puede realizar térmicamente en un único paso. Por lo tanto, tras la impresión de las muestras y siguiendo la recomendación del fabricante de los gránulos, las muestras en verde se han sometido directamente a un ciclo térmico de debinding y sinterizado.

Puesto que los gránulos de PLA + 48% en volumen de WC-5%Ni han sido los únicos que han presentado un flujo de material extruido a través del cabezal extrusor lo suficientemente constante como para imprimir muestras, únicamente se ha podido realizar el sinterizado de muestras fabricadas con este material (véase **Apartado 7.2.4** para más información).

El WC/Ni pertenece a la familia de los metales duros, estos son materiales que presentan una excelente combinación de resistencia mecánica y al desgaste, lo que hace que sean los materiales preferidos para herramientas de corte y mecanizado. Aunque se les llame metales duros no son realmente metales sino más bien materiales compuestos formados por una fase cerámica (WC) que es la que aporta la elevada resistencia mecánica y al desgaste y una metálica (Ni) que rodea a la fase cerámica actuando como aglutinante o binder (**Figura 6.50**) [113-115].

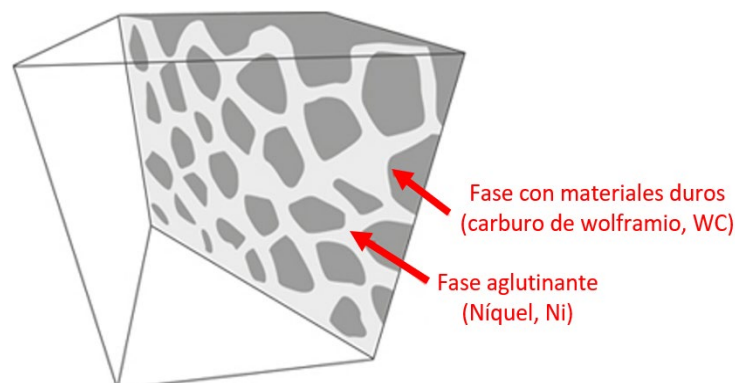


Figura 6.50. Fases principales que conforman un metal duro tipo WC-Ni. (Fuente: adaptado de [116]).

Al sinterizar los metales duros se suele dar lugar a lo que se conoce como sinterización en estado líquido (**Figura 6.51**). El níquel presenta una temperatura de fusión de 1453 °C, pero a 1310 °C es capaz de formar un punto eutéctico con el WC (el punto eutéctico reduce la temperatura de fusión del níquel) generándose una fase líquida que contiene hasta un 4 % de WC en disolución. Esta fase líquida rodea a los gránulos sólidos de WC generando fuerzas capilares que hacen que los gránulos de WC se unan entre ellos lo que reduce los vacíos densificando la pieza. Durante el enfriamiento, la solubilidad del WC en la fase líquida cae por lo que el WC precipita en la matriz de níquel con un tamaño de partícula de alrededor de 1-2 μm (los precipitados mejoran las propiedades mecánicas de la fase metálica, lo que a su vez mejora las propiedades mecánicas de la pieza) [113][115].

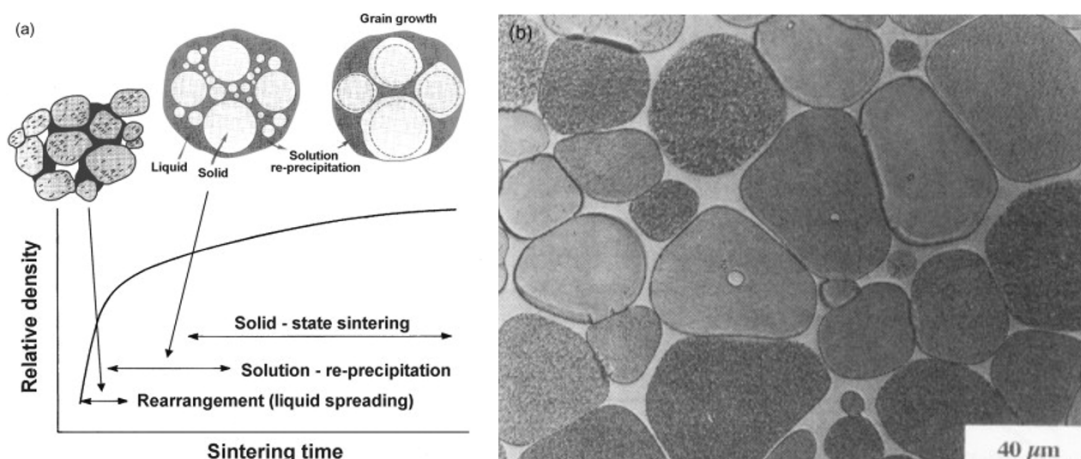


Figura 6.51. Sinterización en fase líquida: (a) etapas de sinterización y (b) microestructura final de una aleación de 95 % tungsteno, 3,5 % níquel y 1,5 % hierro sinterizado a 1475 °C [117].

La selección de una correcta temperatura de eliminación del aglutinante y sinterización no es una tarea sencilla ya que dependerá de la composición del material y de las condiciones de sinterización (presión, atmósfera...). En general, para la sinterización de WC/Ni, la literatura recomienda temperaturas de entre 1400 y 1450 °C durante ~1 h con una rampa de calentamiento/enfriamiento de ~5 °C [114-115][118]. En cuanto a la eliminación del aglutinante se recomiendan temperaturas entre 500 y 600 °C durante ~0,5 - 1h [20][115]. Teniendo todo esto en consideración y dado a que el horno tubular empleado (marca Hobersal modelo ST-16, **Figura 6.52a-c**) no es capaz de superar los 1400 °C se ha sometido a las muestras (**Figura 6.52d**) al ciclo térmico de la **Figura 6.53** empleando una atmósfera de argón para evitar su oxidación.

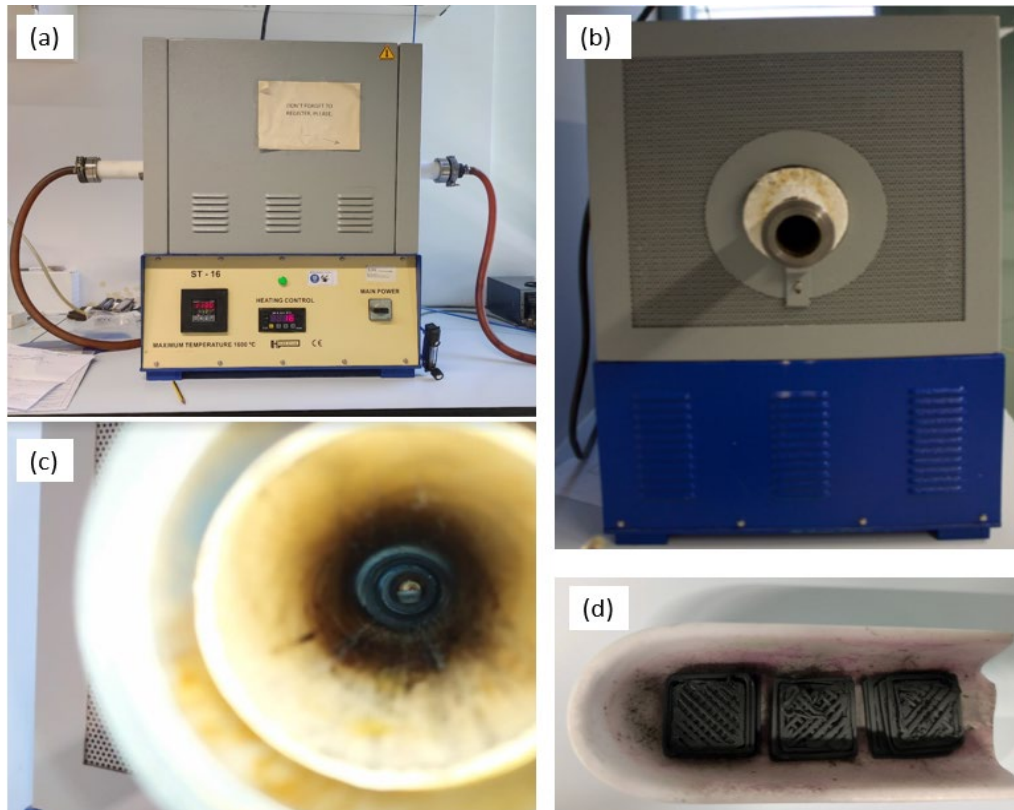


Figura 6.52. Fotografías de (a,b) horno tubular Hobersal Modelo ST-16, (c) muestras colocadas en el interior del horno tubular y (d) muestras en verde antes del debinding térmico y sinterizado.

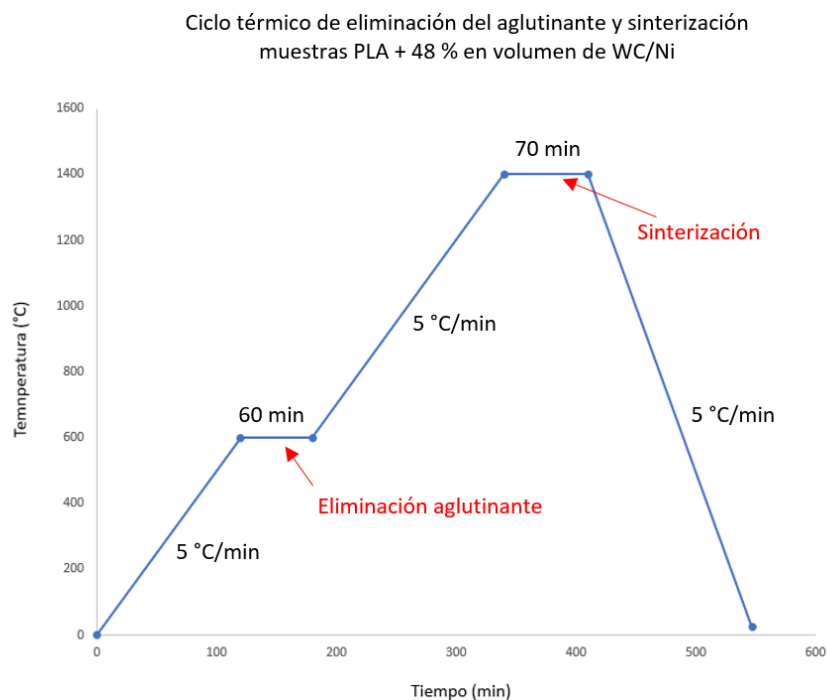


Figura 6.53. Ciclo térmico de eliminación del aglutinante y sinterización al cual se han sometido las muestras de PLA + 48 % en volumen de WC-5%Ni

6.7 Obtención de densidad y porosidad por Arquímedes

La densidad de las muestras tras el sinterizado se ha obtenido empleando el método de Arquímedes. Para esto, se ha empleado una balanza de precisión *Kern EMB-V* (con una resolución de $\pm 0,001$ g) equipada con un kit de determinación de densidades (**Figura 6.54**); en total se realizaron 3 mediciones por cada muestra. Para obtener la densidad de una muestra empleando el método de Arquímedes basta con obtener el peso de la muestra en el aire y sumergida en agua. Al aplicar la **Ecuación 6.2** es posible obtener la densidad de la muestra.

$$\rho = \frac{A}{A-B} \cdot \rho_0 \quad (\text{Ec.6.2})$$

Donde ρ es la densidad de la muestra, ρ_0 es la densidad del agua destilada a temperatura ambiente ($0,9976 \text{ g/cm}^3$ a 23°C), A es el peso de la muestra en el aire y B es el peso de la muestra sumergida en agua.

Para obtener las porosidades, las densidades de las muestras obtenidas mediante Arquímedes se han comparado con su densidad teórica. Puesto que las muestras impresas están compuestas de WC-5%Ni, su densidad teórica ha sido aproximada empleando la regla de las mezclas suponiendo que el WC presenta un 5 % en volumen de Níquel.

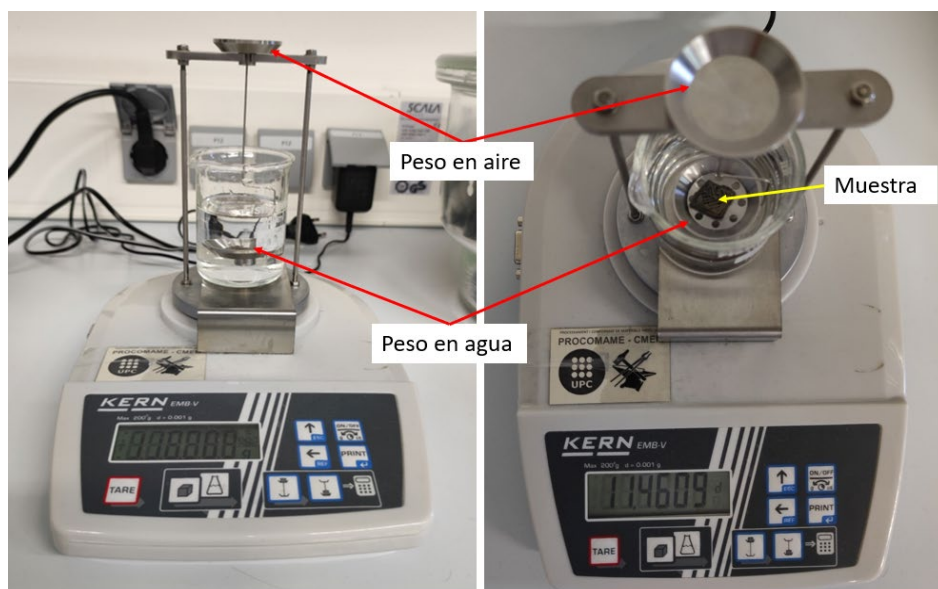


Figura 6.54. balanza de precisión Kern EMB-V con el kit de densidades instalado.

6.8 Preparación de las muestras

Tras la sinterización de las muestras, estas se cortaron transversal y longitudinalmente empleando una cortadora Accutom-2 equipada con un disco de corte de diamante (**Figura 6.55c**). Las muestras se han encastado en baquelita empleando una encastadora Struers LaboPress-3 (**Figura 6.55a**) y se han pulido empleando una pulidora automática Struers LaboPol-5 y papel abrasivo de tamaño de grano 80, 240, 400, 600, 1200 y 2400 y paños con pasta de diamante de tamaño 9, 6, 3 y 1 micras (**Figura 6.55b**).

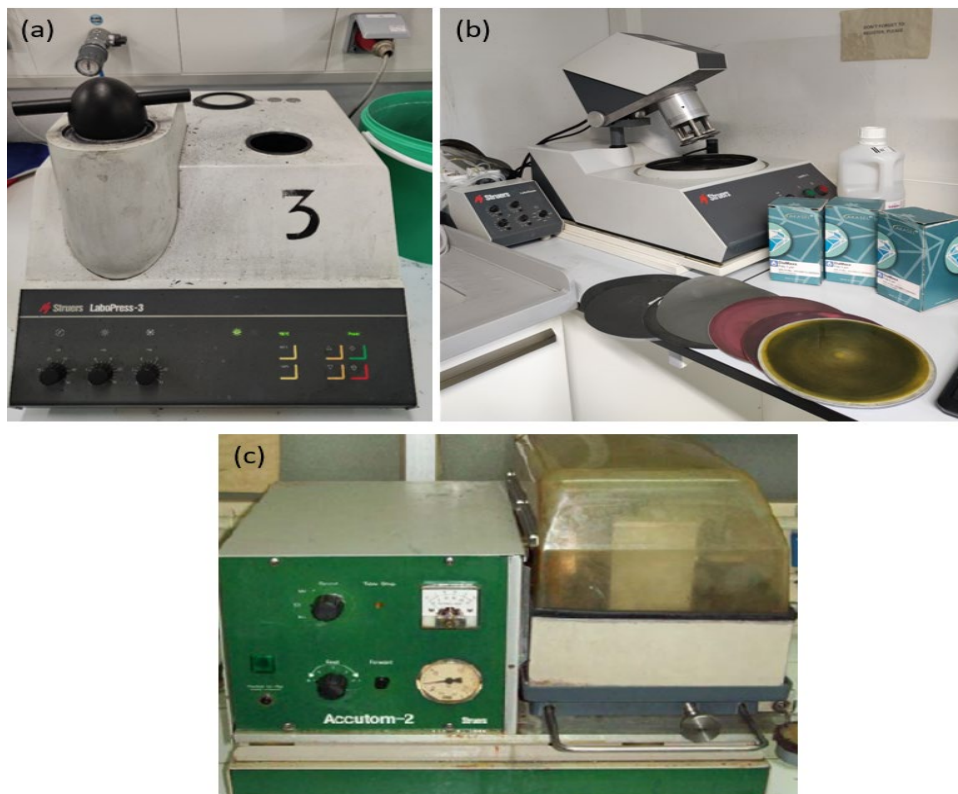


Figura 6.55. (a) encastadora Struers LaboPress-3, (b) pulidora automática Struers LaboPol-5 junto con los diferentes papeles abrasivos, paños y pasta de diamante empleados y (c) cortadora Accutom-2.

6.9 Estudio de las muestras mediante SEM-EDS

La morfología/topografía superficial, composición elemental y cristalografía de los gránulos y algunas muestras impresas con PLA + 48 % en volumen de WC/Ni antes y después de su

sinterizado fueron estudiadas mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), **Figura 6.56**. La morfología/topografía superficial y cristalografía se ha observado empleando electrones secundarios (SE) mientras que la composición química se ha obtenido mediante espectroscopia de energía dispersada (EDS).

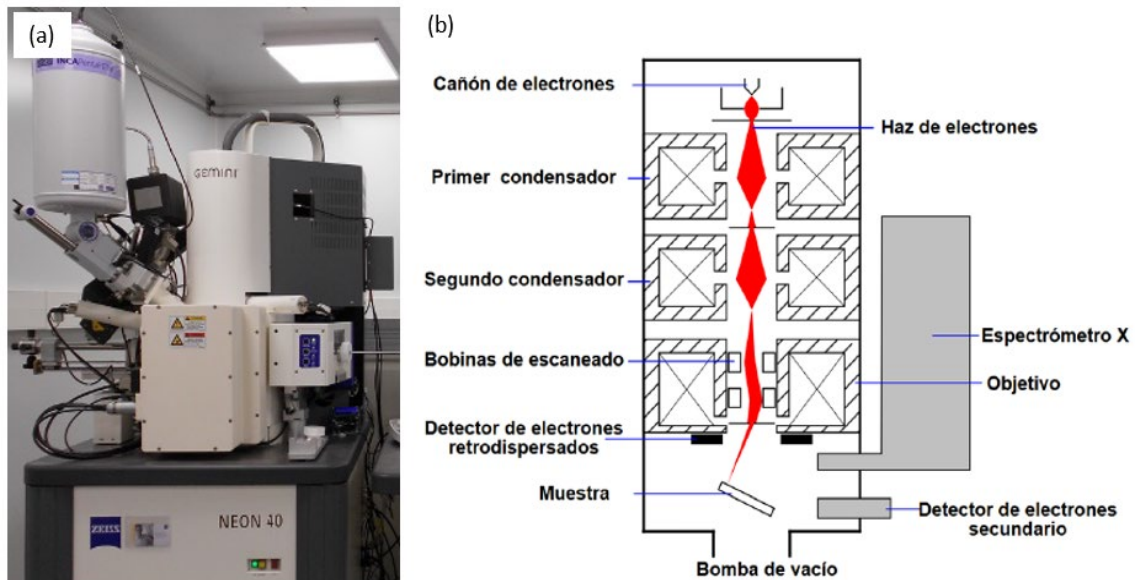


Figura 6.56. (a) Fotografía de uno de los SEM disponibles en la UPC. (b) esquema de los principales componentes del SEM y del recorrido que realiza el haz de electrones a lo largo de la columna [20][119].

Para poder obtener una imagen en un microscopio electrónico de barrido primeramente se ha de generar un haz de electrones en el cañón. En el caso del microscopio empleado, los electrones se producen al calentar un filamento de wolframio (método termoiónico) y el haz se genera al acelerar estos electrones aplicando una diferencia de potencial que suele ir desde 0,05 kV hasta 30 kV. Para muestras que pueden sufrir daños térmicos (como los polímeros) se emplean voltajes pequeños mientras que, para muestras metálicas o cerámicas, se emplean voltajes elevados ya que estas son menos propensas a sufrir daños y se puede utilizar un haz con una mayor aceleración (menor longitud de onda) para lograr una mejor resolución. A medida que el haz de electrones atraviesa la columna del SEM, este es desviado por un ánodo y una serie de pequeñas aperturas y de lentes se encargan de controlar el diámetro del haz y de focalizarlo en la superficie de la muestra, **Figura 6.56b**; a menores diámetros del haz mayores resoluciones se podrán obtener. A continuación, un conjunto de bobinas se encarga de desviar el haz de electrones focalizado para escanear la superficie de la muestra (scanning). Debido a la facilidad

que tienen los electrones de dispersarse, para controlar el haz es necesario mantener un elevado nivel de vacío dentro de la columna del SEM. El impacto del haz de electrones con los átomos de la muestra da lugar a la generación de varios tipos de radiación que puede ser registrada y analizada por los diferentes detectores. El análisis de estas radiaciones permite obtener valiosa información sobre la muestra como: morfología y topografía superficial, composiciones químicas, cristalografía... [20][119-120]; un esquema de qué información se puede obtener con cada tipo de radiación se presenta en la **Figura 6.57**.

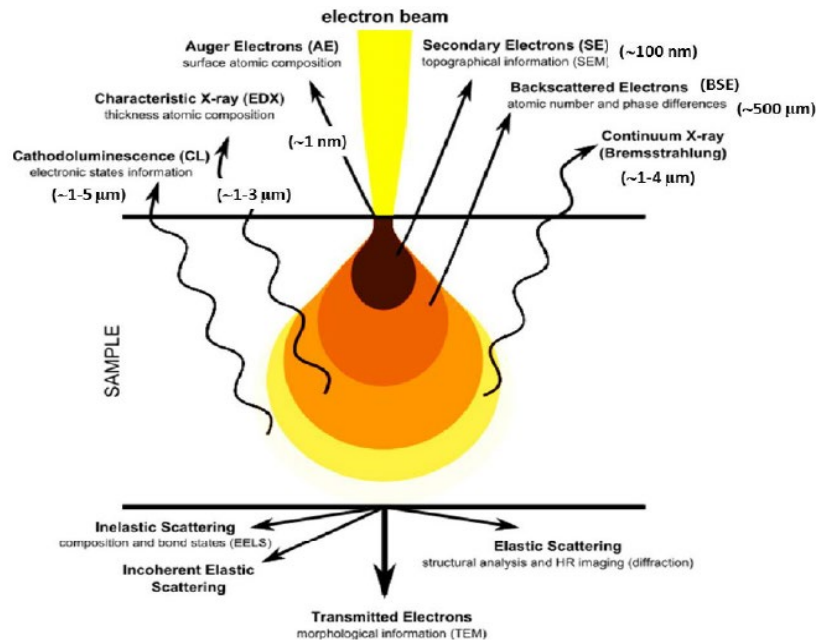


Figura 6.57. Esquema de las diferentes radiaciones que se generan al interaccionar el haz de electrones con los átomos de la muestra junto con su volumen de interacción [120].

El tipo de radiación más comúnmente estudiada en un SEM son los electrones secundarios, estos electrones presentan una muy baja energía (inferior a 5 eV), por lo tanto, se han de encontrar situados muy cerca de la superficie para poder fugarse, ofreciendo una valiosa información sobre la topografía de la muestra. Otro tipo de radiación que es de gran utilidad estudiar es la que emiten los rayos X; para estudiar estas radiaciones el SEM ha de tener instalado un sensor EDS. En un espectro de rayos X se manifiestan picos a diferentes energías y, puesto que cada elemento presenta un conjunto de picos a energías características (**Figura 6.58a**), es posible determinar la composición elemental de la muestra. La tecnología EDS junto con el SEM permite escanear la superficie de la muestra y realizar un *mapping* de la composición elemental de la

superficie (**Figura 6.58b**). Por último, es importante aclarar que, puesto que la longitud de onda de un electrón es considerablemente más pequeña que la de la luz visible, no es posible obtener imágenes a color empleando un SEM [20][119-120].

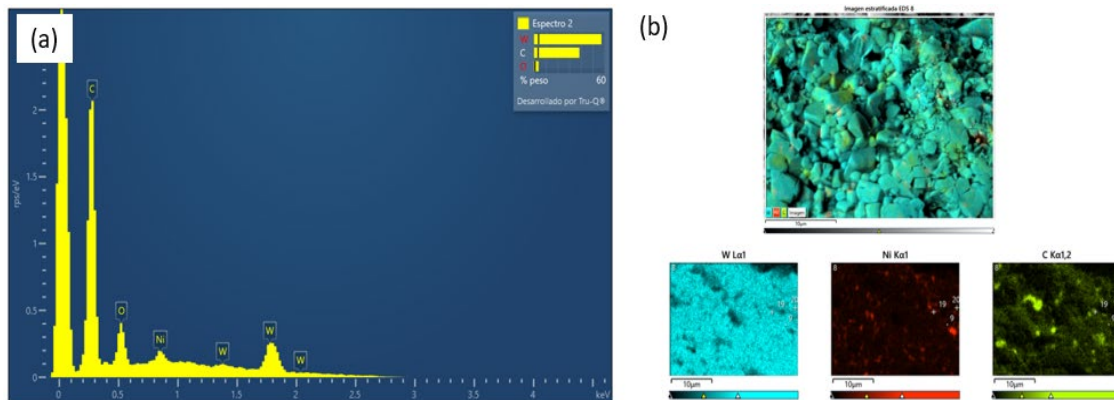


Figura 6.58. Ejemplo de (a) espectro de rayos x y (b) mapping de la composición elemental de una superficie obtenidos mediante SEM-EDS. (Fuente: elaboración propia).

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Determinación de las propiedades características de los gránulos y dimensiones mínimas de la tolva

7.1.1 Geometría de los gránulos

En las **Figuras 7.1 - 7.4** se presentan imágenes de microscopía óptica de cada uno de los gránulos estudiados. Se puede observar que, aunque la geometría de los gránulos es irregular, se podría decir que los gránulos cargados de Ti6Al4V y grafito presentan una geometría más o menos redondeada mientras que los gránulos cargados con WC/Ni presentan una geometría más similar a placas (todo y que en estos últimos también se pueden observar gránulos redondeados, sobre todo para las partículas más pequeñas). Se cree que la geometría más irregular de los gránulos cargados con WC/Ni sería debido a su menor tiempo de molienda durante su proceso de fabricación; es de esperar que mayores tiempos de molienda den lugar a gránulos más pequeños y redondeados [121].

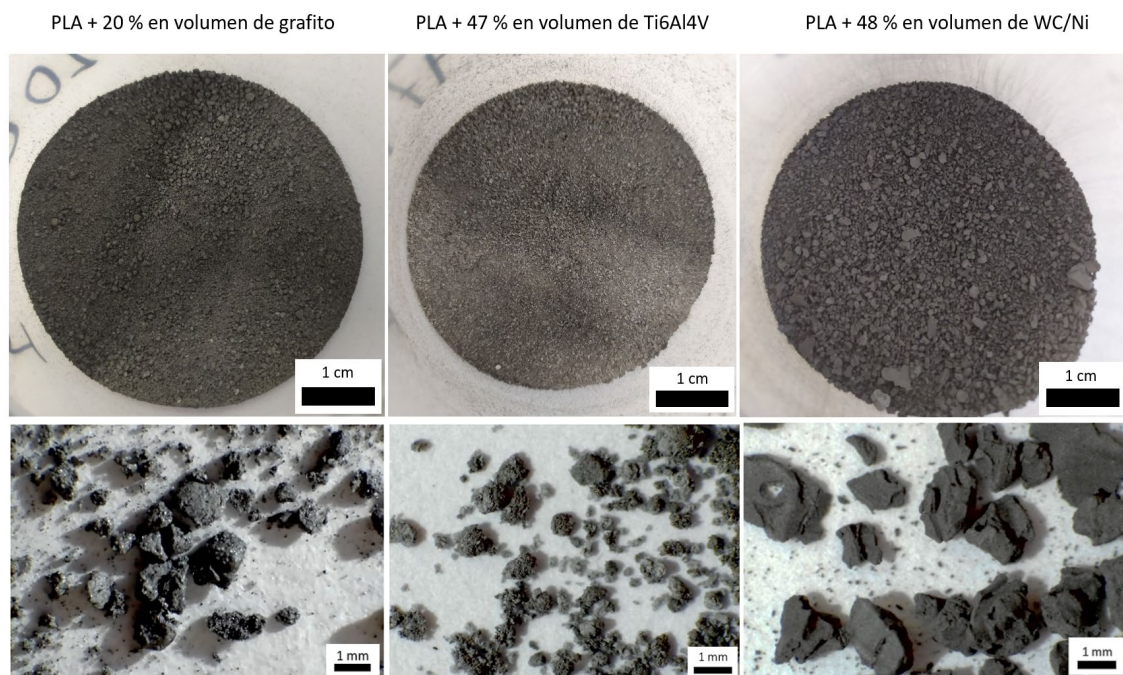


Figura 7.1. Imagen comparativa de los diferentes gránulos estudiados a simple vista (superior) y a través de microscopía óptica (inferior).

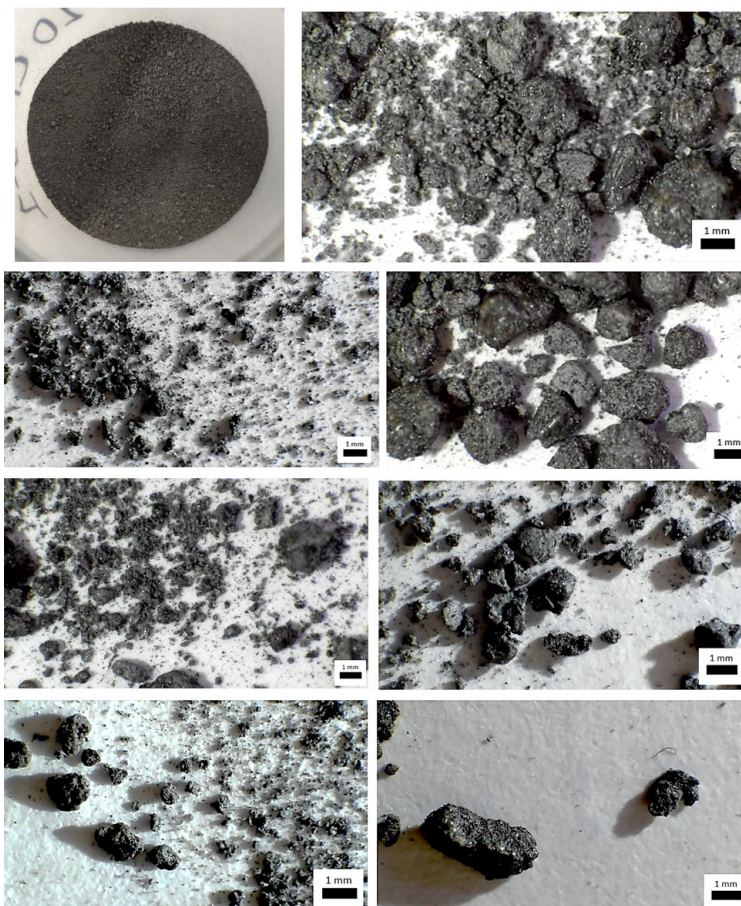


Figura 7.2. Gránulos de PLA + 20 % en volumen en grafito vistos a simple vista (primera imagen marco superior izquierdo) y a través de microscopía óptica (resto de imágenes).

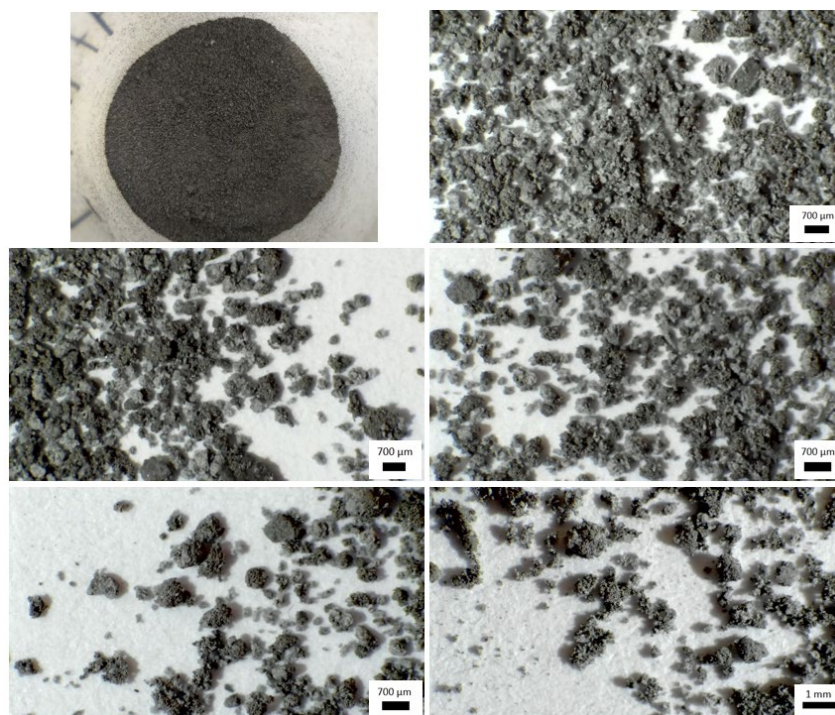


Figura 7.3. Gránulos de PLA + 47 % en volumen en Ti6Al4V vistos a simple vista (primera imagen marco superior izquierdo) y a través de microscopía óptica (resto de imágenes)

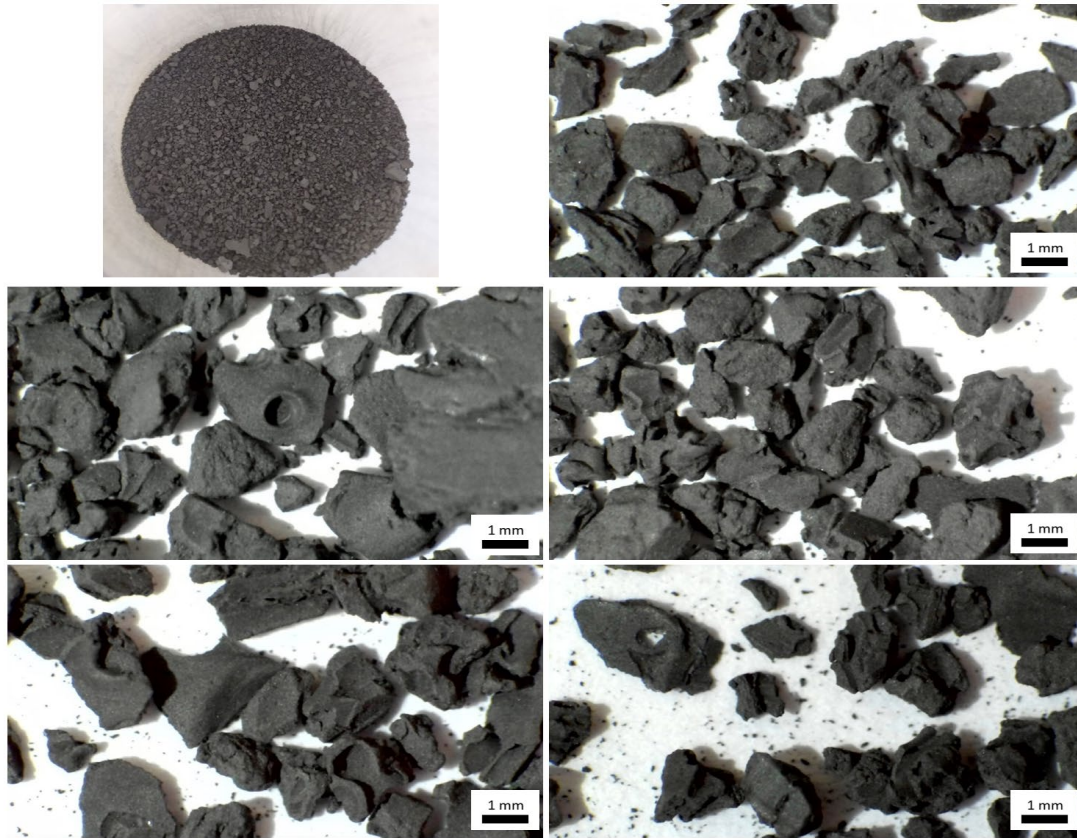


Figura 7.4. Gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni vistos a simple vista (primera imagen marco superior izquierdo) y a través de microscopía óptica (resto de imágenes).

7.1.2 distribución del tamaño de partícula de los gránulos

La distribución del tamaño de partícula obtenida para los diferentes gránulos se presenta en las **Figuras 7.5 - 7.6** y en la **Tabla 7.1**. Los gránulos de PLA + Ti6Al4V son los que presentan un menor rango de tamaño de partícula (0,035 - 0,79 mm) seguido de los de PLA + grafito (0,032 - 1,61 mm) y por último de los de PLA + WC/Ni (0,03 - 2,58 mm) (**Tabla 7.1**). Los gránulos de PLA + Ti6Al4V y de PLA + grafito presentan distribuciones con unos D10, D50 y D90 relativamente similares. Por otro lado, los gránulos de PLA + WC/Ni presentan un D10 muy similar al de los gránulos de PLA + grafito y de PLA + Ti6Al4V, pero sus valores de D50 y D90 son considerablemente superiores. Mientras que el 90 % de la distribución del tamaño de partícula (D90) de los gránulos de PLA + grafito y de PLA + Ti6Al4V presenta un valor inferior a 0,64 y 0,54 mm respectivamente, en el caso del PLA + WC/Ni, el 90 % de la distribución (D90) presenta un valor inferior a 1,73 mm y el 50 % de la distribución (D50) un valor inferior a 0,71 mm; estos mayores valores de D90 y D50 se ven reflejados en las curvas de la **Figura 7.5** en donde se puede observar que los gránulos cargados con WC/Ni presentan dos poblaciones claramente

diferenciadas (una población con un pico principal en 0,04 mm y la otra con un pico en 1,06 mm). En esta misma figura se puede observar como la distribución del tamaño de partícula de todos los gránulos estudiados presenta un pico principal entre 0,04 y 0,042 mm y picos secundarios a tamaños más elevados.

En un primer lugar se pensó que los picos secundarios podrían ser debidos a aglomeraciones de partículas producidas durante el proceso de manufactura de los gránulos. Pero, tras consultar al fabricante de los gránulos, este indicó que los picos secundarios son debidos al tiempo empleado de molienda. Tras realizar el mezclado coloidal de las partículas inorgánicas con el polímero termoplástico, se obtienen una especie de escamas las cuales se muelen hasta alcanzar el tamaño de gránulo deseado. En este caso, debido a que se trata de una materia prima todavía en estado experimental, no se tienen datos sobre cuál podría ser el tamaño de gránulo más apropiado para su uso en una impresora de MEAM-HP y, por esta razón, se emplearon diferentes tiempos de molienda lo que dio lugar a diferentes distribuciones del tamaño de partícula para que, de esta forma, se pudiera estudiar qué distribución puede ser más óptima para ser procesada. Los fabricantes de los gránulos no disponen del tiempo exacto de molienda, pero indicaron que los gránulos de PLA + WC/Ni fueron los que recibieron un menor tiempo de molienda mientras que los gránulos de PLA + Ti6Al4V son los que recibieron un mayor tiempo de molienda; esto tendría sentido pues es de esperar que mayores tiempos de molienda den distribuciones más estrechas y homogéneas con menores tamaños de partícula [121].

Desde el punto de vista del tamaño, se cree que es posible que los gránulos de PLA + Ti6Al4V sean los que den menos problemas a la hora de alimentar el extrusor por presentar el menor rango de tamaño de partículas (0,035 - 0,79 mm) junto con una geometría relativamente redondeada. Por otro lado, el mayor rango de tamaño de los gránulos de PLA + WC/Ni (0,031 - 2,58 mm), junto con su geometría más irregular, podrían hacer que fuera el material que más problemas de a la hora de alimentar el extrusor (posibles bloqueos en la tolva, problemas de flujo de alimentación...). Para intentar reducir al máximo las obstrucciones, la literatura recomienda un tamaño mínimo de salida en la tolva (d) de 2,5 veces el tamaño más grande de partícula para gránulos con tamaños de partícula aleatorios (distribución del tamaño de partícula ancha) y de 5 veces el tamaño más grande de partícula para gránulos con tamaños de partícula similares (distribución del tamaño de partícula estrecha) [93]. Dado a que los gránulos de PLA + WC/Ni son los que presentan un mayor tamaño de partícula, se estima que el diámetro mínimo de salida de la tolva para garantizar el flujo de los gránulos de PLA + WC/Ni debería de ser superior a 12,92 cm.

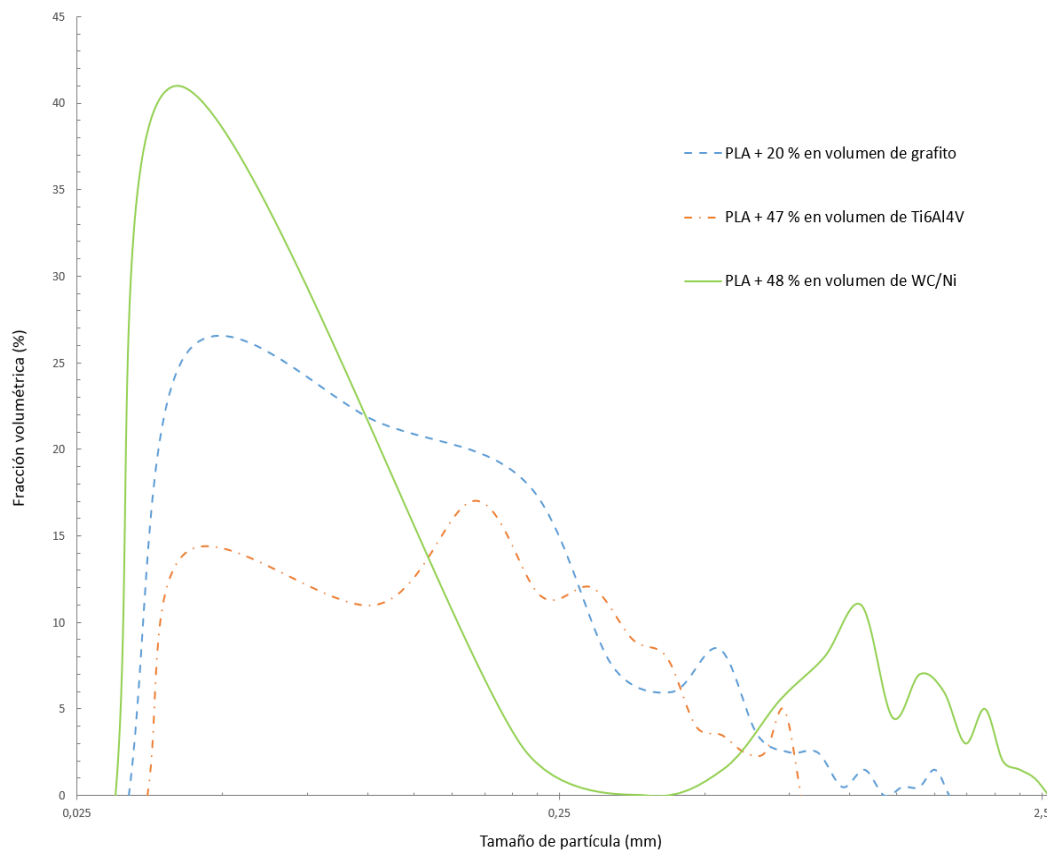


Figura 7.5. Distribución del tamaño de partícula de los diferentes gránulos estudiados.

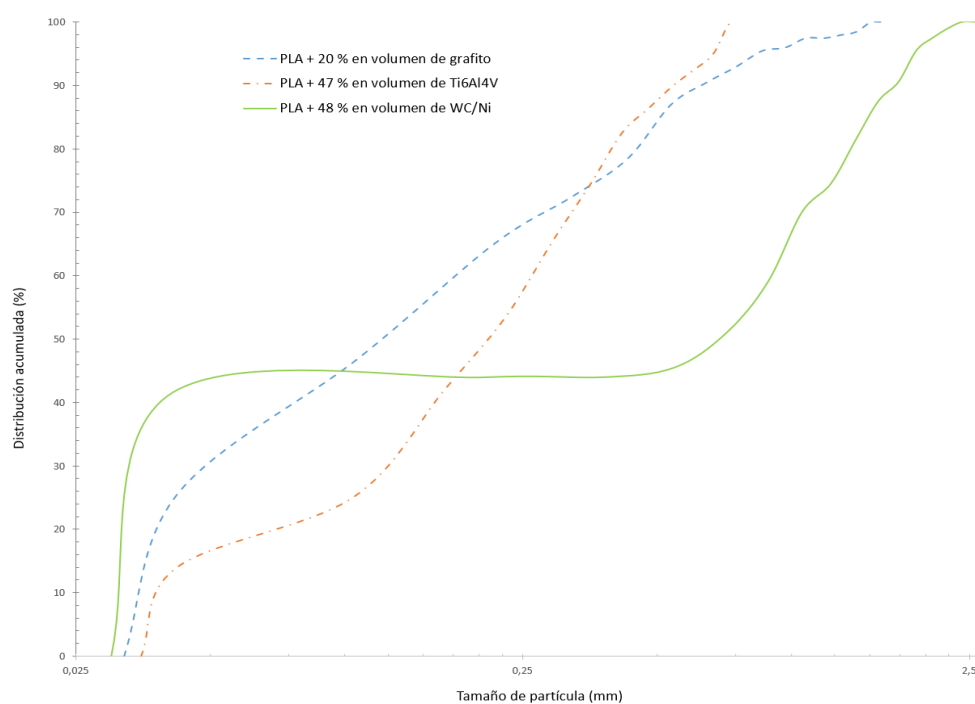


Figura 7.6. Distribución acumulada del tamaño de partícula de los diferentes gránulos estudiados.

Tabla 7.1. Distribución del tamaño de partícula de los diferentes gránulos estudiados. D90 describe el tamaño donde el 90 % de la distribución tiene un tamaño de partícula más pequeño y el 10 % tiene un tamaño de partícula más grande. En D10 el 10 % de la distribución tiene un tamaño de partícula más pequeño y el 90 % tiene un tamaño más grande. En D50 el 50 % de la distribución tiene un tamaño de partícula más pequeño y el 50 % tiene un tamaño de partícula más grande.

	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Rango tamaño partícula (mm)
PLA + 20 % en volumen de grafito	0,034	0,11	0,64	0,032 - 1,61
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	0,038	0,22	0,54	0,035 - 0,79
PLA + 48 % en volumen de WC/Ni	0,031	0,71	1,73	0,031 - 2,58

7.1.3 Ángulo de reposo de los gránulos e inclinación mínima requerida en la tolva

Los ángulos de reposos obtenidos para los diferentes gránulos se presentan en la **Tabla 7.2**. Se puede observar cómo los ángulos de reposo de los diferentes gránulos son relativamente parecidos entre ellos, siendo los gránulos de PLA + 20 % en volumen de grafito los que presentan el menor ángulo de reposo (29,8 °), seguido de los de PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V (34,2°) y finalmente los de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni (36,3 °). Es de esperar que los gránulos de PLA + WC/Ni presenten el mayor ángulo de reposo pues, según la literatura, los gránulos con un mayor tamaño de partícula y geometrías menos esféricas presentarán mayores ángulos de reposo [88]. Por otro lado, sorprende el hecho que los gránulos de PLA + Ti6Al4V presenten el segundo mayor ángulo de reposo pues estos son los que tienen, con diferencia, el menor tamaño de partícula junto con una geometría redondeada y, por lo tanto, deberían presentar el menor ángulo de reposo. Según la literatura, gránulos con los tamaños de partícula muy pequeños, como en el caso de los gránulos de PLA + Ti6Al4V, pueden exhibir cohesión debido al efecto electrostático y al incremento de la su capacidad de absorber humedad, lo que aumenta el ángulo de reposo [88].

En cuanto al ángulo de inclinación mínimo requerido en la tolva, según los resultados obtenidos y las recomendaciones dadas en la literatura (véase **Apartado 4.4** para más detalles), se estima que una inclinación de 52,5 ° en la tolva sería suficiente para garantizar la fluencia de todos los gránulos estudiados.

Tabla 7.2. Ángulos de reposo y ángulos mínimos de inclinación de la tolva obtenidos para los diferentes gránulos.

	Ángulo de reposo gránulos (α) (°)	Ángulo mínimo de inclinación requerido en la tolva (β) (°)
PLA + 20 % en volumen de grafito	29,8 ± 2,1	46,8
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	34,2 ± 1,5	50,7
PLA + 48 % en volumen de WC/Ni	36,3 ± 1,2	52,5

7.1.4 Ensayo de Carney

En la **Tabla 7.3** se comparan los resultados obtenidos al medir el flujo de Carney de un polvo de referencia empleando el embudo de Carney impreso en 3D y un embudo de Carney comercial. Se puede observar como el flujo de Carney obtenido con el embudo impreso en 3D no dista excesivamente del valor de flujo de Carney obtenido con el embudo comercial (diferencia < 1,3 s); esta diferencia podría ser debida a aglomeraciones del material, errores de medida o a ligeras variaciones dimensionales en el embudo fabricado (por ejemplo, que el agujero sea ligeramente más grande de 5 mm). La similitud en los resultados da a pensar que el embudo de Carney impreso en 3D sería una herramienta válida para comparar la fluidez de los gránulos estudiados.

Tabla 7.3. Flujo de Carney de un polvo de referencia obtenido empleando el embudo de Carney impreso en 3D y un embudo de Carney comercial. *La composición del polvo de referencia es: 92,5 % Cu puro + 7 % Cu-P + 5 aditivos anticracking.

Flujo de Carney polvo de referencia*	
	(s/50g)
Embudo de Carney impreso en 3D	5,1 ± 0,5
Embudo de Carney comercial	6,4

En la **Tabla 7.4** se presenta el flujo de Carney obtenido para los diferentes gránulos estudiados (antes y después de su secado) empleando el embudo de Carney impreso en 3D. Puesto que ninguno de los gránulos estudiados fluyó libremente a través del embudo (el orificio de salida del embudo se atascaba), ni siquiera tras su secado, los resultados de flujo de Carney que se reportan han sido obtenidos aplicando agitación al embudo. Los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni son los que han presentado, con diferencia, el menor flujo de Carney seguido de los gránulos de PLA + 20 % en volumen de grafito y finalmente de los de PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V; se desea aclarar que, un menor flujo de Carney (s/g) implica una mayor fluencia del material (g/s) pues estos valores son inversamente proporcionales. Tras secar los gránulos, se ha podido observar un ligero aumento de su fluencia (disminución del flujo de Carney de entre 0,3 a 1 s/10g) lo que podría ser debido a la pérdida de humedad sufrida por los gránulos durante el secado. En cuanto a la densidad aparente de los gránulos, se puede observar que esta es inferior a su densidad másica; esto es de esperar pues siempre existirá aire entre los gránulos. Según la literatura, gránulos con geometrías más esféricas presentarán densidades aparentes más similares a la densidad másica mientras que gránulos con geometrías más irregulares presentarán una mayor diferencia entre la densidad másica y la densidad aparente [88]. Sorprende el hecho de que los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni sean los que presentan la mayor relación densidad aparente/densidad másica ya que estos son los que presentan una geometría más irregular. La razón de esta mayor relación podría ser debida al hecho de que los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni presentan un mayor tamaño de partícula. En general, cuanto más grandes son las partículas, menor es la superficie específica de

los gránulos, este fenómeno disminuye la fricción entre las partículas aumentando la densidad aparente [88]. Otra razón de la mayor relación densidad aparente/densidad másica del PLA + 48 % en volumen de WC/Ni podría ser debido al hecho de que sus gránulos presentan una distribución del tamaño de partícula bimodal claramente marcada (una población con un pico principal en 0,04 mm y la otra con un pico en 1,056 mm, **Figura 7.5**) lo que podría favorecer que las partículas más pequeñas (con geometría redondeada) ocupen los huecos generados entre las partículas más grandes (con geometría más irregular) aumentando la densidad aparente de los gránulos [88].

Los resultados obtenidos dan a pensar que los gránulos que exhibirán un mejor flujo a través de la tolva serán los de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni pues son los que han presentado un menor flujo de Carney (un menor flujo de Carney implica una mayor fluencia del material). Estos resultados son sorprendentes pues los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni son los que presentan un mayor tamaño y una geometría más irregular. Se cree que el mayor flujo de los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni comparado con el resto de gránulos podría ser debido a su mayor densidad másica y relación densidad aparente/densidad másica junto con su mayor tamaño de partícula. Según la literatura, es de esperar que, a mayor densidad másica (por lo tanto, mayor gravedad específica) y relación densidad aparente/densidad másica mejor sea el flujo de material. Por otro lado, las partículas pequeñas presentan peores flujos de material en parte a su menor densidad aparente y a que se encuentran más fuertemente influenciadas por las fuerzas electrostáticas, lo que incrementa la cohesión entre partículas debido al efecto electrostático aumentando la probabilidad de atoramientos en la tolva [122]. Al mismo tiempo, debido a que las partículas pequeñas presentan una mayor superficie específica, se incrementa la capacidad de adsorción de humedad de los gránulos lo que a su vez aumenta la cohesión de las partículas disminuyendo el flujo de material [123].

Tras ensayar los gránulos empleando el embudo de Carney impreso, se ha podido observar que, si bien es cierto que aplicando una agitación manual se pueden obtener resultados de flujo de Carney, esta agitación no será del todo homogénea lo que afectará a la fiabilidad de los resultados. Por lo tanto, se cree que, para un estudio más preciso del flujo de este tipo de gránulos, sería necesario diseñar nuevos tipos de embudos que permitan el flujo de material sin necesidad de aplicar agitación (por ejemplo, ampliando el orificio de salida del embudo).

Tabla 7.4. Resultados obtenidos en el ensayo de Carney para los diferentes gránulos empleando el embudo impreso en 3D. *Los datos de densidad másica han sido aportados por el fabricante de los gránulos.

	Flujo sin agitación	Flujo de Carney gránulos sin secar (s/10g)	Flujo de Carney gránulos secados (s/10g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad másica (g/cm ³)*	Relación densidad aparente/ densidad másica
PLA + 20 % en volumen de grafito	No	30,1 ± 2,4	29,7 ± 1,5	0,37 ± 0,05	1,44	0,26
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	No	37,6 ± 0,6	36,2 ± 0,7	0,83 ± 0,04	2,76	0,30
PLA + 48 % en volumen de WC/Ni	No	9 ± 1,1	8,6 ± 0,6	2,75 ± 0,1	7,85	0,35

7.1.5 Fluencia de los gránulos en la tolva fabricada

En la **Tabla 7.5** se presentan los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de fluencia de los diferentes gránulos a través de la tolva fabricada. Los gránulos de PLA + 48% en volumen de WC/Ni han presentado flujo másico a través de la tolva. Por otro lado, los gránulos de PLA + 20 % en volumen de grafito han presentado un flujo principalmente másico, todo y que también se ha podido observar flujo de embudo en algunos momentos del ensayo, sobre todo al inicio del ensayo cuando la tolva presentaba mayor cantidad de material. Finalmente, los gránulos de PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V no han fluido a través de la tolva (atasco de material) pero sí que lo han hecho al aplicar agitación a la tolva. El no flujo del PLA + Ti6Al4V podría ser debido a que sus gránulos presentan el menor tamaño de partícula (0,035 - 0,79 mm) lo que, tal y como se ha explicado en el **Apartado 7.1.4**, reduce la densidad aparente de los gránulos e incrementa el efecto de las fuerzas electrostáticas y la adsorción de la humedad aumentando la cohesión de los gránulos y la probabilidad de atoramientos en la tolva.

Los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de fluencia de los diferentes gránulos a través de la tolva coinciden con la fluencia predicha al realizar el ensayo de Carney (**Apartado 7.1.4**), siendo los gránulos de PLA + 48% en volumen de WC/Ni los que han presentado un mejor flujo. Por lo tanto, se cree que una metodología similar a la del embudo de Carney (con las mejoras

necesarias para asegurar el flujo de material sin requerir agitación) podría ser empleada con éxito en futuros estudios para predecir la fluencia de este tipo de gránulos.

Tabla 7.5. Resultados obtenidos tras realizar el ensayo de fluencia de los diferentes gránulos a través de la tolva fabricada, además de algunas propiedades características de estos gránulos relevantes para el estudio de su fluencia.

Material	Tipo de flujo en la tolva	Flujo observado en la tolva	Flujo de Carney gránulos secados (s/10g)	Rango tamaño de partícula (mm)	Geometría de las partículas	Relación densidad aparente/densidad másica
PLA + 20 % en volumen de grafito	Másico con algunos momentos de flujo de embudo	Bueno	$29,7 \pm 1,5$	0,032 - 1,61	Redondeada	0,26
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	No flujo sin agitación y flujo con agitación	Malo	$36,2 \pm 0,7$	0,035 - 0,79	Redondeada	0,3
PLA + 48% en volumen de WC/Ni	Másico	Excelente	$8,6 \pm 0,6$	0,03 - 2,58	Redondeada (partículas pequeñas) / Equiaxial irregular (partículas grandes)	0,35

7.2 Estudio del flujo de material extruido y determinación de los parámetros de impresión

En este apartado se van a presentar los resultados relacionados con el efecto que tienen los diferentes parámetros de impresión en el flujo de material extruido y, por lo tanto, las dimensiones del filamento extruido y el resultado final de la pieza, además de intentar realizar una selección de cuáles podrían ser los parámetros de impresión más óptimos para imprimir los gránulos de PLA + carga inorgánica. Antes de discutir los resultados se quiere aclarar que, la

interpretación y comparación con la literatura de los resultados obtenidos es algo complejo pues el flujo se ve afectado por una gran variedad de parámetros como: la cantidad de carga inorgánica, el grado de la matriz polimérica, la fuerza ejercida para extruir el material o el diámetro de la boquilla, entre otros. A esto hay que sumarle que la tecnología empleada para fabricar los gránulos de PLA + carga inorgánica aún se encuentra en desarrollo y está patentada por lo que todavía no existen estudios similares al realizado en este trabajo.

7.2.1 Flujo de extrusión de la materia prima en forma de filamentos

En el gráfico de la **Figura 7.7** se presentan el flujo de extrusión en función de la temperatura obtenido para los diferentes filamentos estudiados (filamentos de PLA y ABS puro y de PLA + 20 % en volumen de hidroxiapatita y PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V, la explicación de porque se han estudiado estos filamentos se encuentra en el **Apartado 6.5.1**). Se puede observar que cada uno de los filamentos estudiado presenta una temperatura de inicio de extrusión a partir de la cual es posible comenzar a extruir el filamento, estas temperaturas coinciden con las temperaturas de fusión indicadas por los fabricantes (**Tabla 7.6**). Comparado con el PLA puro, el PLA cargado con partículas inorgánicas presenta una menor temperatura de inicio de extrusión. Esto podría ser debido al tipo de PLA empleado por el fabricante (Colfeed) para la obtención de los filamentos cargados; tras realizar un estudio bibliográfico, se cree que Colfeed emplearía PLA 2003D (con una temperatura de fusión de ~150-160 °C [87]) mientras que el filamento de PLA puro estudiado está compuesto de PLA 3D870 (con una temperatura de fusión de ~180 °C [124]).

Los resultados de flujo obtenidos para el ABS y el PLA puro presentan una tendencia lineal creciente al aumentar la temperatura; esta tendencia lineal creciente es característica de este tipo de filamentos de impresión 3D [125][87]. Por otro lado, los filamentos con carga inorgánica (PLA + 20 % en volumen de hidroxiapatita y PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V) se ajustan a una tendencia polinómica creciente de orden 4. Según el estudio realizado por Eguíluz et al. [87], la tendencia polinómica es debida a la adición de las partículas inorgánicas lo que da lugar a interacciones físicas y químicas (pseudoenredos) entre las cadenas poliméricas y las partículas inorgánicas modificadas (tal y como se ha explicado en el **Apartado 3.2**, durante el mezclado coloidal, las partículas inorgánicas se recubren con un polielectrolito para mejorar su afinidad con la matriz polimérica). A temperaturas relativamente bajas (150 - 210 °C), los filamentos con carga inorgánica presentan un comportamiento similar al PLA puro en donde un pequeño

aumento de la temperatura no conlleva a variaciones considerables del flujo. Por otro lado, a temperaturas altas (210 - 260 °C), los filamentos con carga inorgánica presentan un comportamiento más similar al ABS puro en donde pequeñas variaciones de temperatura pueden tener un efecto considerable sobre el flujo. Este cambio en el comportamiento del material podría deberse a que, a temperaturas cercanas a los 210 °C, la matriz polimérica que envuelve a las partículas inorgánicas comienza a volverse excesivamente líquida (reducción drástica de la viscosidad) lo que aumenta considerablemente el flujo de material extruido dificultando su control.

El comportamiento del flujo de extrusión en función de la temperatura que presentan ambos polímeros cargados con partículas inorgánicas es muy parecido. A temperaturas bajas ambos filamentos muestran un comportamiento del flujo similar hasta los 180 °C, momento en el cual se comienzan a observar diferencias entre sus flujos. En el rango de 180 a 260 °C, el PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V presenta un flujo un 13-19 % inferior al del filamento de PLA + 20 % en volumen de partículas de hidroxiapatita. Esta diferencia en el flujo podría ser debida al efecto de la carga inorgánica. Según Rane et al. [94], un incremento de la carga inorgánica aumenta la viscosidad de material en estado fundido, por lo tanto, es de esperar que el PLA + 47% en volumen de Ti6Al4V, al contener una mayor cantidad de carga orgánica, presente una mayor viscosidad (en general, un aumento de la viscosidad implica una disminución del flujo de extrusión).

Según el fabricante de los gránulos, a temperaturas elevadas la matriz polimérica que envuelve a las partículas inorgánicas comienza a volverse excesivamente líquida lo que aumenta las interacciones partícula - partícula (las partículas inorgánicas friccionan entre ellas); este efecto se vería más potenciado en el caso del PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V ya que presenta una mayor cantidad de carga inorgánica (hay más partículas por lo que hay mayor probabilidad de que friccionen entre ellas). Debido a esto, los fabricantes recomiendan evitar temperaturas de impresión superiores a los 210 °C, pues se incrementa la posibilidad de que se produzca un atasco en la boquilla provocado por la licuación excesiva de la matriz polimérica y fricción de las partículas inorgánicas entre ellas. A pesar de esto, durante el estudio del flujo no se observó ningún atasco en la boquilla. Esto podría deberse a que el diámetro de boquilla empleado (1 mm) es lo suficientemente grande como para evitar atascos. Se recomienda realizar más ensayos con boquillas más pequeñas para estudiar el efecto de este fenómeno en el flujo.

Por lo tanto, se cree que 150 - 210 °C podría ser un rango de temperatura óptimo para realizar la extrusión de los filamentos de PLA + carga inorgánica ya que este es el rango en donde se podría obtener un control más óptimo del flujo y minimizar la generación de atascos en la

boquilla. Puesto que los gránulos estudiados han sido fabricados por el mismo fabricante que los filamentos con carga inorgánica (empleando una composición del aglutinante, cantidad de carga y proceso de fabricación muy similares), es de esperar que los gránulos presenten un comportamiento de flujo de extrusión similar al observado en los filamentos siendo muy probable que su rango de temperatura de extrusión óptimo se encuentre entre 150 - 210 °C.

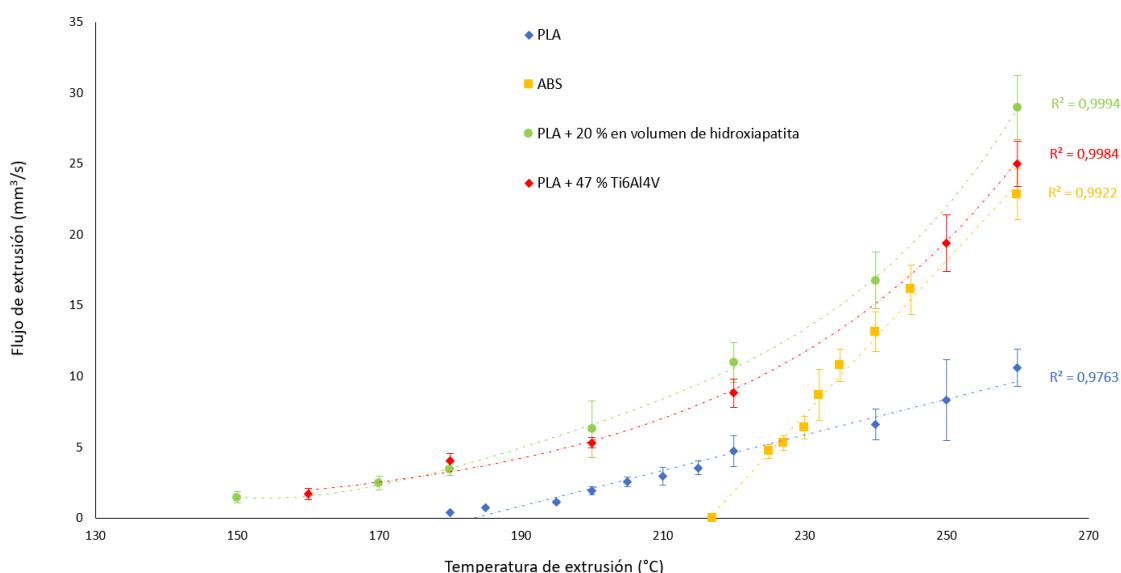


Figura 7.7. Flujo de extrusión en función de la temperatura obtenido para los diferentes filamentos ensayados empleando una boquilla de 1 mm de diámetro y una fuerza constante de alimentación del filamento de 8 N.

Tabla 7.6. Características de los filamentos ensayados.

	ρ (g/cm ³)	ϕ filamento (mm)	T. fusión (°C)	T. degradación (°C)	T. inicio extrusión (°C)	T. impresión (°C)
Filamento de ABS puro	1,05	1,70	~ 200 - 220	380 - 430	225	225 - 250
Filamento de PLA puro	1,25	1,70	~ 170 - 180	300 - 400	180	180 - 230
Filamento de PLA + 20 % en vol. de hidroxiapatita	1,63	1,50	152	320	150	-
Filamento de PLA + 47% en vol. de Ti6Al4V	2,76	1,65	151	325	~ 160	-

7.2.2 Flujo de extrusión de la materia prima en forma de gránulo

El flujo de extrusión observado al extruir los pellets de PLA puro ha sido relativamente constante con una variación máxima del 5 % en el peso de los filamentos extruidos (**Tabla 7.7**). La geometría de los filamentos extruidos es la deseada y no se han observado defectos superficiales ni burbujas de aire en los filamentos extruidos (el PLA puro extruido es transparente lo que permite estudiar a simple vista la presencia de burbujas internas). Por otro lado, el flujo de extrusión observado al extruir los gránulos de PLA + carga inorgánica, independientemente de la temperatura y shear rate aplicados, ha sido extremadamente irregular llegando a haber momentos en los que el flujo de material extruido se detenía por completo; esto ha hecho que no fuera posible realizar medidas de una forma fiable y se ha decidido no reportar los resultados. Existen varias hipótesis sobre cuál podría ser la causa de este flujo irregular a la hora de extruir los gránulos. La primera, y más común en las técnicas de impresión 3D que extruyen material a través de una boquilla, sería un atoramiento en la boquilla producido por aglomeraciones de material; en el caso de los gránulos, al estar cargados de partículas inorgánicas sólidas, se aumenta la probabilidad de atascos en la boquilla. Todo y esto, el tamaño de boquilla empleado (0,8 mm) debería de ser lo suficientemente grande como para evitar atascos; la literatura recomienda tamaños de entre 2,5 y 5 veces más grandes que el tamaño medio de partículas inorgánicas [98] (en este caso se ha empleado una boquilla 4 veces más grande que el tamaño medio de las partículas inorgánicas). Por lo tanto, se cree que la causa más probable del flujo irregular al extruir los gránulos sería debido a una insuficiente alimentación de material al husillo. Al abrir la tolva para observar el interior del husillo durante el proceso de extrusión, se ha podido observar que se forma un agujero de rata (*rat-holing*) alrededor del husillo de forma que los gránulos quedan apilados en las paredes generándose un agujero que rodea al husillo por lo que este no es capaz de “agarrar” los gránulos e introducirlos hacia el interior del barril (el barril es la cámara que rodea al husillo) (**Figura 7.8**); los agujeros de rata podrían formarse debido a un tamaño de partícula de los gránulos demasiado pequeño junto con una temperatura demasiado elevada en la zona de alimentación del husillo lo que fomenta la cohesión de los gránulos y dificulta su agarre por parte del husillo. Cuando se agita el cabezal se ha podido observar una mejora temporal del flujo de material extruido, lo que podría ser debido a que la agitación “desmorona” los agujeros de rata facilitando que el husillo pueda recoger los gránulos e introducirlos en el barril. Por último, durante el proceso de limpieza del cabezal (en donde se

extruyen pellets de PLA puro para limpiar el interior del extrusor) se ha podido observar que los gránulos fundidos que todavía se encuentran en el interior del barril fluyen con un flujo excelente a través de la boquilla. Se cree que esto sería debido a que los pellets que se están introduciendo en el barril empujan los gránulos que se encuentran en la zona final del barril, lo que podría confirmar la hipótesis de que el flujo irregular al extruir los gránulos sería un problema de alimentación del husillo el cual no es capaz de introducir la cantidad necesaria de material en el barril como para garantizar un flujo constante de material.

Se proponen varias soluciones para intentar resolver la problemática del flujo irregular de extrusión de los gránulos. (1) Aumentar el tamaño de partícula de los gránulos para que tengan un tamaño medio de unos 3 mm (similar al de los pellets de PLA) de forma que el husillo tenga una mayor facilidad para agarrarlos. (2) Mejorar el sistema de alimentación de tal manera que los gránulos, tras pasar por la tolva, caigan directamente entre los filetes del husillo de una forma similar a lo que sucede con los husillos colocados en horizontal empleados en extrusión de polímeros. (3) Aplicar agitación durante la impresión para hacer colapsar los agujeros de rata que se forman alrededor del husillo. (4) Disminuir la temperatura en la zona de alimentación más cercana a la garganta de la tolva para fomentar la descohesión del material y evitar la formación de agujeros de rata. (5) Rediseñar el husillo de forma que sea capaz de agarrar los gránulos de forma más efectiva.

Tabla 7.7. Pesos obtenidos al extruir 100 mm de filamento con una velocidad de giro del husillo de 30 rpm a diferentes temperaturas.

	200 °C	210 °C	220 °C
PLA	0,26 ± 0,01 g	0,35 ± 0,02 g	0,37 ± 0,02 g
PLA + 20 % en volumen de grafito			
PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	Flujo muy irregular, no posibilidad de extruir material de forma continua.		
PLA + 48 % en volumen de WC/Ni			

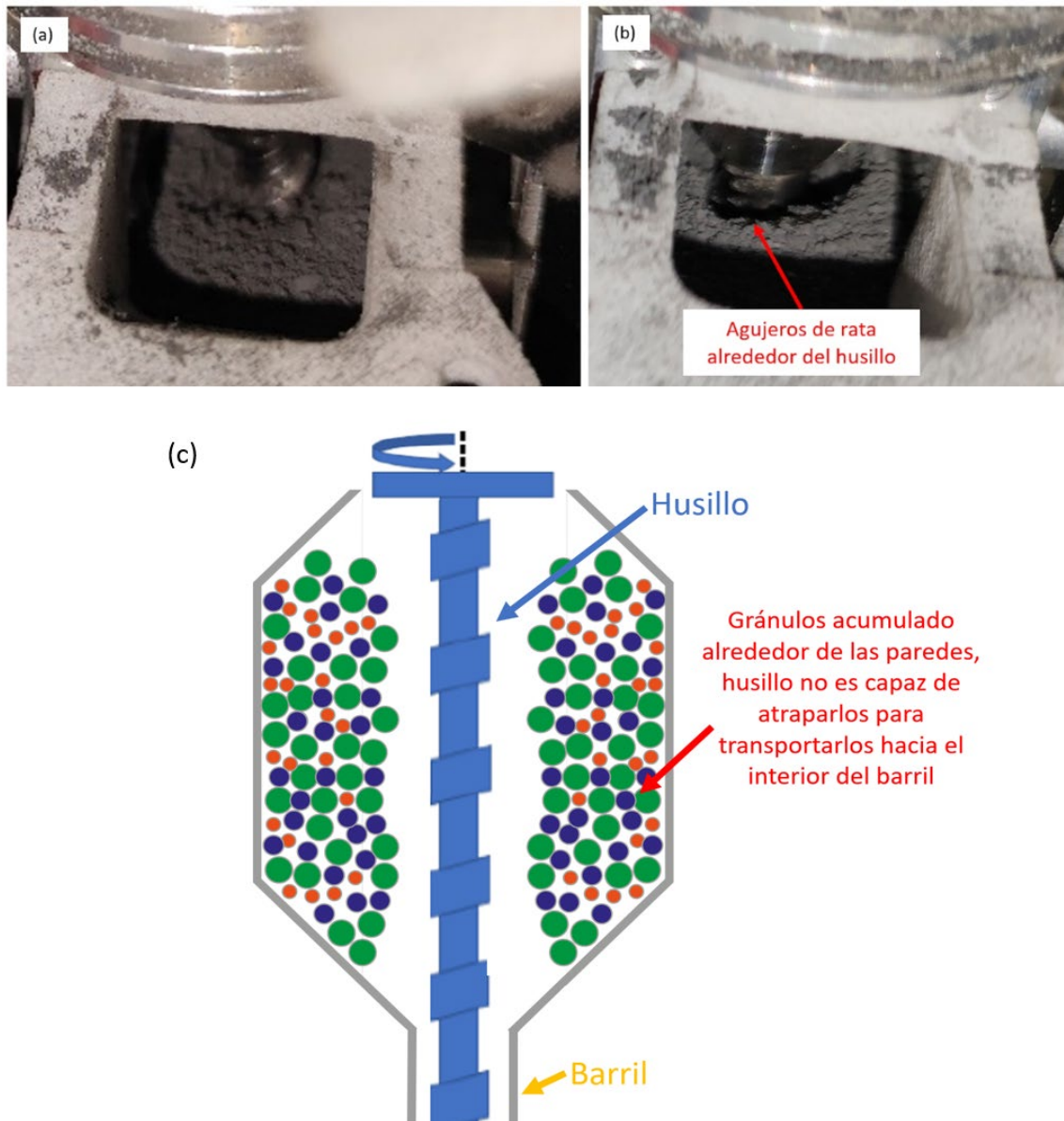


Figura 7.8. Fotografías de (a) gránulos de PLA + WC/Ni en el interior del cabezal justo antes de iniciar la extrusión y (b) mismos gránulos durante el proceso de extrusión en donde se pueden observar los agujeros de rata que forman los gránulos alrededor del husillo (apilamiento del material en las paredes generando un agujero rodeando al husillo por lo que este no es capaz de agarrar material e introducirlo en el barril). (c) esquema del rat-holing que se produce en la zona de alimentación del husillo. (Fuente: elaboración propia).

7.2.3 Selección de los parámetros de impresión de los gránulos

Debido al flujo irregular obtenido al extruir los gránulos, no ha sido posible imprimir muestras con la repetibilidad suficiente como para poder realizar un completo estudio de los parámetros de impresión. A pesar de esto, durante el estudio del flujo de extrusión y los diferentes intentos de impresión de las muestras (tanto empleando los pellets de PLA puro como los gránulos), se han podido alcanzar algunas conclusiones respecto a los parámetros de impresión.

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 6.2.3**, el cabezal extrusor de husillo empleado dispone de dos calefactores. Al extruir los pellets de PLA puro se ha podido observar que, cuando el calefactor superior (el más cercano a la zona de alimentación) se encuentra a temperaturas superiores a 180 °C, se comienzan a producir atoramientos en el husillo que impiden que este pueda girar. Al desmontar la tolva para ver el interior del husillo, se ha encontrado material semifundido en la zona de alimentación previa a la entrada del barril bloqueando el husillo (**Figura 7.9**); en esta zona el material aún debería de estar sin fundir en forma de pellets. La causa de esta fusión no deseada es debida a una temperatura excesivamente alta en la zona de alimentación y se soluciona al emplear temperaturas inferiores a 180 °C en el calefactor superior. En el caso de los gránulos de PLA + carga inorgánica, no se observó esta problemática aun y empleando temperaturas superiores a los 200 °C, lo que podría ser debido a su menor tamaño de partícula.

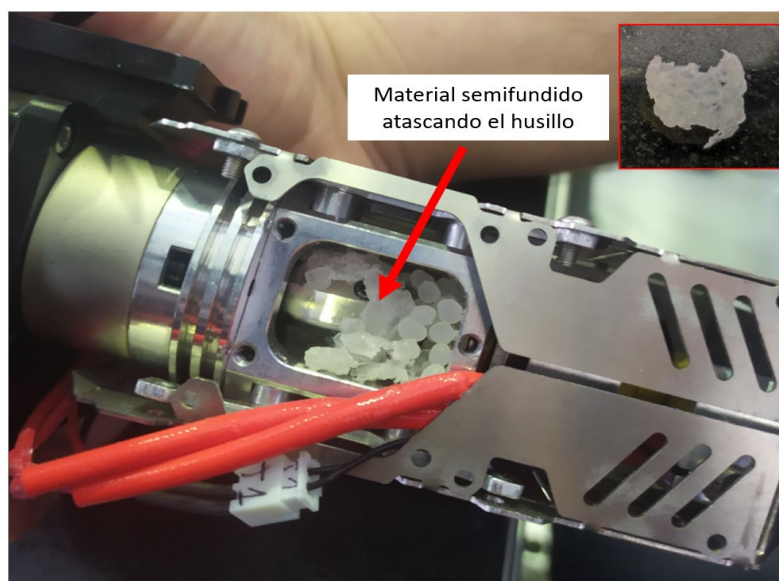


Figura 7.9. Fotografía del interior del cabezal extrusor en donde se puede observar material semifundido bloqueando el husillo; en esta zona el material aún debería de estar sin fundir en forma de pellet.

El rango de temperaturas en la boquilla que ha dado mejores resultados tanto para los pellets de PLA puro como para los gránulos se encuentra entre 180 - 200 °C. Temperaturas inferiores a 180 °C reducen considerablemente la adhesión de los filamentos y el flujo de material extruido (por lo que el husillo ha de girar a una mayor velocidad para alcanzar el flujo deseado aumentándose la probabilidad de que este se bloquee). A pesar de esto, y aunque es algo difícil de concluir debido al flujo irregular de los gránulos, se cree que una vez solucionadas las irregularidades en el flujo, los gránulos podrían ser extruidos con éxito a temperaturas inferiores a 180 °C ya que el husillo es capaz de girar más rápidamente sin bloquearse debido al menor tamaño de partícula de los gránulos y, a estas temperaturas, se ha podido observar que los gránulos presentan una mayor fluencia que los pellets de PLA puro (lo que correspondería con los resultados obtenidos en el **Apartado 7.2.1** al comparar el filamento de PLA puro y el cargado con partículas inorgánicas). A temperaturas superiores a 200 °C se comienza a producir una disminución excesiva de la viscosidad del material lo que puede llegar a afectar negativamente a las dimensiones del filamento extruido; esta disminución es mucho más marcada en el caso de los gránulos, lo que también coincidiría con los resultados obtenidos en el **Apartado 7.2.1**.

A temperaturas de alrededor de 220 °C se ha podido observar un amarillamiento al extruir los pellets de PLA puro el cual se intensifica al aumentar el tiempo de residencia del PLA en el extrusor (**Figura 7.10**). Este amarillamiento es indicativo de un proceso de degradación del PLA, lo que no es deseable pues empeorará las propiedades mecánicas de la pieza. Por lo tanto, se recomienda evitar temperaturas de 220 °C o superiores o, si no es posible, reducir lo máximo posible el tiempo de residencia del material en el extrusor a estas temperaturas. En el caso de los gránulos, al ser estos de color negro y opacos, no es posible observar un cambio de coloración, pero se cree que estos también podrían sufrir degradación térmica a temperaturas cercanas a los 220 °C. Las razones que dan a pensar esto serían el hecho de que el principal componente de su aglutinante es PLA y el hecho de que a estas temperaturas se ha podido observar que el filamento extruido pierde por completo su dimensionalidad lo que podría ser producido por una caída en exceso de la viscosidad del material provocada por el inicio de la degradación térmica del PLA que contine el aglutinante.



Figura 7.10. Filamentos extruidos con PLA puro a 220 y 190 °C (izquierda y derecha respectivamente) en donde se puede observar la tonalidad amarilla que adquiere el PLA al degradarse térmicamente.

El flujo irregular al extruir los gránulos ha dado lugar a que las dimensiones de los filamentos extruidos no sean constantes, y, por lo tanto, ha imposibilitado el correcto estudio de parámetros de impresión como la altura y anchura de capa, la superposición o la relación $V_{\text{Cabezal}}/V_{\text{Extrusión}}$, entre otros. En la **Figura 7.11** se presenta una imagen de dos intentos de impresión realizados con los mismos parámetros de impresión (empleando gránulos de PLA + 48% en volumen de WC/Ni) en donde se puede observar claramente como la muestra de la izquierda presenta un llenado incompleto debido a un flujo de extrusión insuficiente mientras que la de la derecha presenta un llenado excesivo debido a un flujo de extrusión demasiado elevado. Tras los diferentes intentos de impresión, en la **Tabla 7.8** se presentan los parámetros de impresión que han dado los mejores resultados. Se desea aclarar que estos valores son meramente orientativos y que, una vez solucionada la problemática del flujo irregular de extrusión, podrían divergir considerablemente de los parámetros óptimos de impresión.



Figura 7.11. Muestras de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni impresas con los mismos parámetros de impresión. La muestra de la izquierda presenta un llenado insuficiente mientras que la muestra de la derecha presenta un llenado excesivo debido a un flujo irregular de extrusión.

Tabla 7.8. *Parámetros de impresión que han dado los mejores resultados a la hora de imprimir piezas empleando los gránulos suministrados por Colfeed y el cabezal extrusor de husillo de Tumaker. Una explicación en detalle sobre el significado de cada uno de estos parámetros se puede encontrar en el Apartado 5.*

Diámetro de la boquilla (D_b) (mm)	T. en el calefactor superior ($^{\circ}\text{C}$)	T. en la boquilla ($^{\circ}\text{C}$)	T. en la cama de impresión ($^{\circ}\text{C}$)	Altura primera capa (h) (mm)	Altura resto de capas (h) (mm)
0,8	170	190	60	0,4	0,5
Anchura de capa (w) (mm)	Diámetro (D)	Superposición (%)	Patrón de relleno	Densidad de relleno (%)	Velocidad del cabezal (V_{cabezal}) (mm/s)
0,8	1,75	50	Rectilíneo $0^{\circ}/90^{\circ}$	100	10
Multiplicador de extrusión (M221)	velocidad giro husillo (rpm)	Relación $V_{\text{Cabezal}}/V_{\text{Extrusión}}$	Tiempo estimado impresión pieza (min)		
2,5	30	0,4	2 min		

7.2.4 Estudio dimensional de las muestras impresas antes del debinding y sinterizado (muestras en verde)

En las **Figuras 7.12 - 7.14** y en la **Tabla 7.9** se presentan los resultados obtenidos tras realizar la impresión de muestras en verde de PLA puro y de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni, con geometría prismática cuadrangular (10 x 10 x 4 mm) y empleando los parámetros de impresión propuestos en el **Apartado 7.2.3 (Tabla 7.8)**. De todos los gránulos estudiados, únicamente se reportan los resultados obtenidos para los de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni ya que, al imprimir con los otros gránulos, el flujo de material extruido era demasiado irregular como para imprimir las muestras. El mejor flujo de los gránulos de WC/Ni podría ser debido a su mayor tamaño de partícula, lo que facilita a la tolva y al husillo el transporte de los gránulos al interior

del barril. Aunque el flujo de material extruido al emplear los gránulos de WC/Ni era mejor que el de los otros gránulos, este continuaba siendo irregular por lo que no ha sido posible imprimir las muestras con la altura deseada (las impresiones se han parado en cuanto ha dejado de fluir material) y es la razón por la que no se reporta ni su altura ni su peso.

Las muestras impresas empleando pellets de PLA puro han presentado un peso y unas dimensiones muy similares entre ellas, con una desviación estándar de 0,1 g para el peso, y de 0,3 mm para los lados y 0,06 mm para la altura (**Figura 7.12**). Si bien es cierto que las dimensiones medias obtenidas (16,2 x 16,1 x 4,1 mm) se alejan de las dimensiones esperadas (10 x 10 x 3 mm) la precisión dimensional se podría mejorar con una mejor calibración de la impresora y optimización de los parámetros de impresión. Todo y el flujo irregular al extruir los gránulos, se han logrado imprimir 6 muestras de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni con dimensiones relativamente similares entre ellas en los lados de la base (desviaciones estándar de entre 0,9 y 1,3 mm) pero con alturas insuficientes debido a que el flujo irregular obligaba a detener las impresiones (**Figura 7.13**). Se desea aclarar que las dimensiones reportadas para las muestras de PLA + 48 % en volumen son aproximadas, pues su obtención se ha visto dificultada por los defectos dimensionales generados por el flujo irregular de material extruido. Al igual que en el caso de las muestras de PLA puro, la precisión dimensional se podría aumentar optimizando los parámetros de impresión y mejorando el flujo de material extruido.

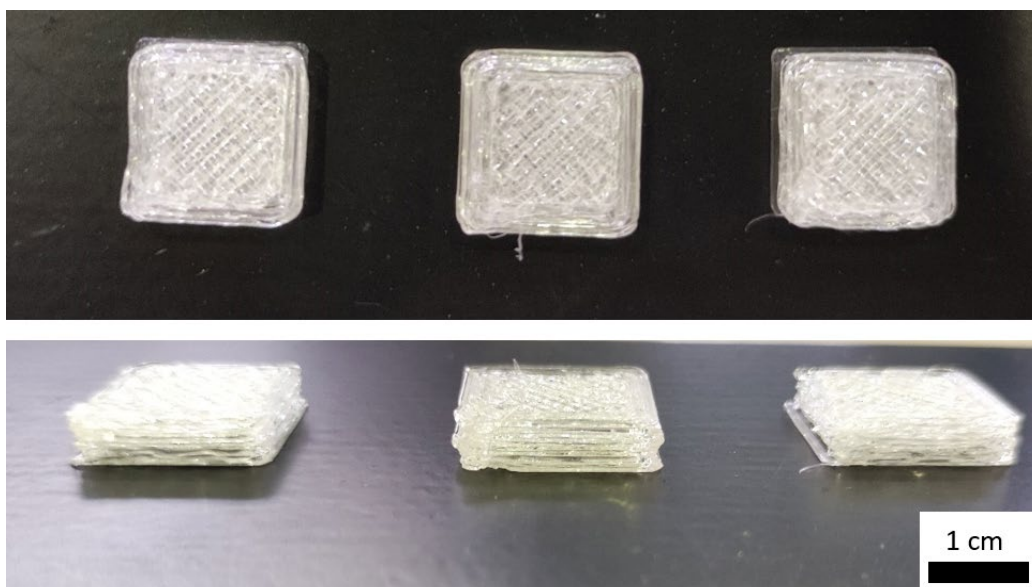


Figura 7.12. Muestras de PLA puro impresas empleando los parámetros de impresión de la Tabla 7.8.

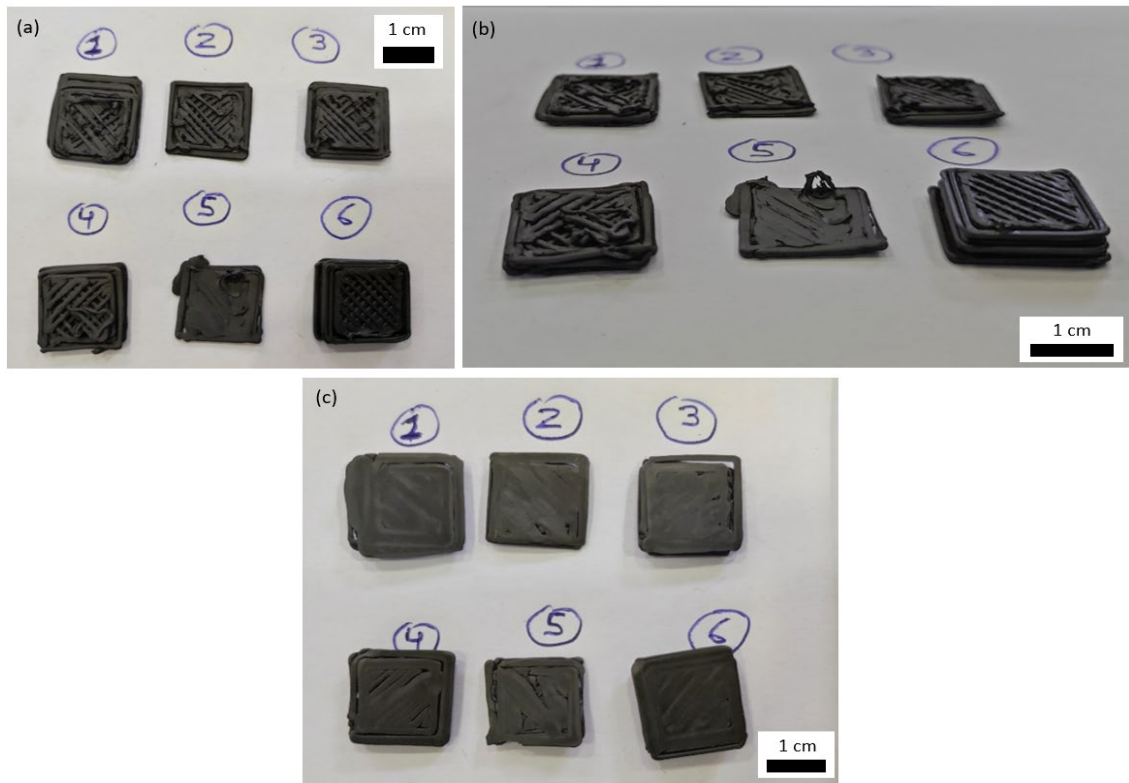


Figura 7.13. Fotografías, desde diferentes puntos de vista, de las 6 muestras en verde de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni impresas empleando los parámetros de impresión de la Tabla 7.8.

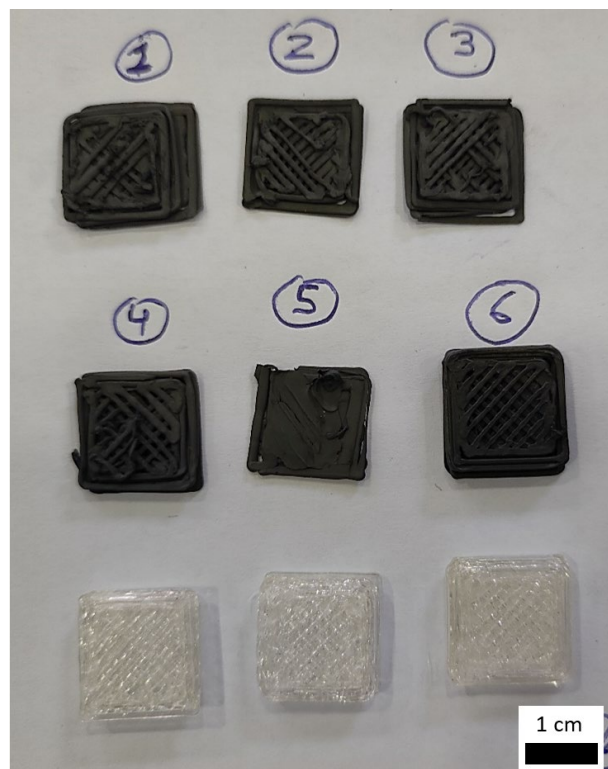


Figura 7.14. Muestras de PLA puro (transparentes) y PLA + 48 % en volumen de WC/Ni (oscuras) impresas empleando los mismos parámetros de impresión.

Tabla 7.9. Dimensiones y pesos obtenidos de muestras de 10 x 10 x 4 mm impresas empleando los parámetros de la Tabla 7.8. L_1 y L_2 corresponden a las dimensiones de los lados y h a la altura.

	L_1 (mm)	L_2 (mm)	h (mm)	Peso (g)
Dimensiones esperadas	10	10	3	-
PLA puro	$16,2 \pm 0,3$	$16,1 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
PLA + 48 % en volumen de WC/Ni	$16,6 \pm 0,9$	$16,7 \pm 1,3$	-	-

7.2.5 Estudio dimensional de las muestras impresas tras el debinding y sinterizado

De las 6 muestras obtenidas de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni, se ha realizado la eliminación del aglutinante y el sinterizado de las muestras 1, 4 y 6 (**Figura 7.15**); el resto de muestras no se ha sinterizado ya que no presentaban las características adecuadas para su estudio (por ejemplo, altura demasiado baja y/o relleno insuficiente). En las **Figuras 7.15 - 7.16** se presentan imágenes de las muestras antes (muestra en verde) y después de su debinding y sinterizado.

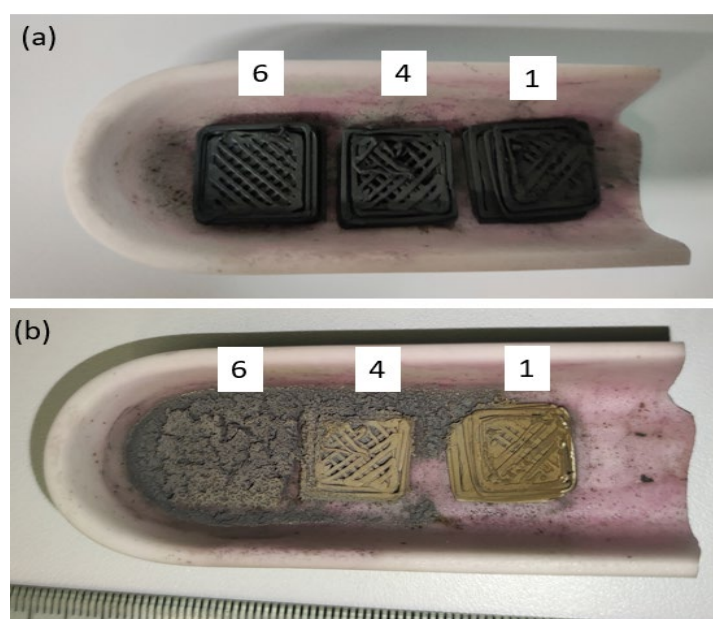


Figura 7.15. Muestras 6,4,1 (de izquierda a derecha) impresas empleando los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni antes (a) y después (b) de un sinterizado a 1400 °C durante 70 minutos.

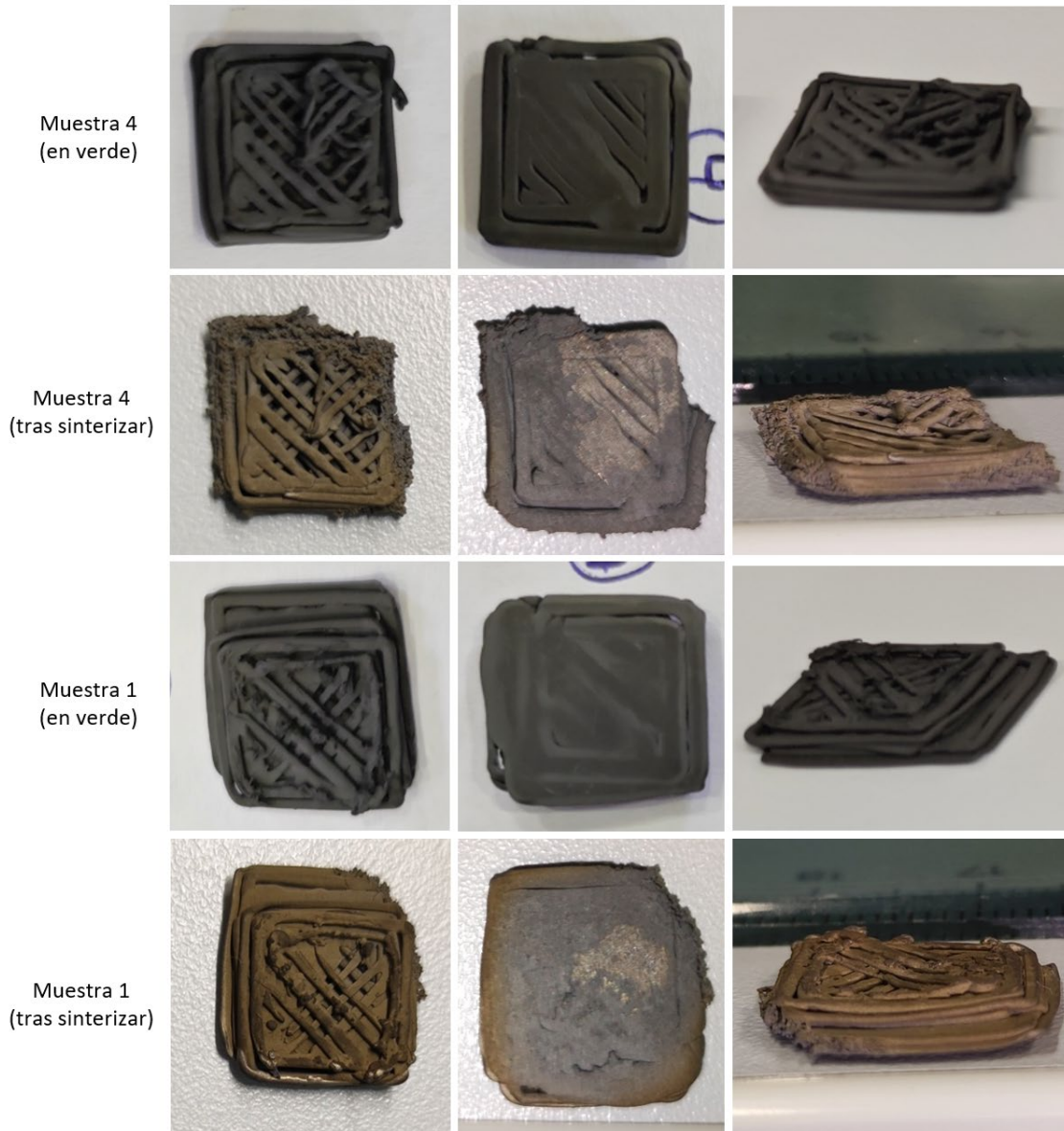


Figura 7.16. Muestras 4 y 1 de WC/Ni vistas desde diferentes puntos de vista antes (pieza en verde) y tras un sinterizado a 1400 °C durante 70 minutos.

En la **Figura 7.15** se puede observar que la muestra 6 se ha carbonizado durante la sinterización. Esto podría ser debido a que la cantidad de carga inorgánica que contenía la muestra no ha sido lo suficiente elevada como para que esta pueda sinterizar (la muestra estaba principalmente compuesta por PLA). La explicación de porque la cantidad de carga inorgánica ha sido tan baja en esta muestra podría ser debido a que, cada vez que se cambiaba el material de impresión, se limpiaba el cabezal extrusor empleando gránulos de PLA puro. El PLA puro es barato y transparente por lo que es comúnmente empleado para limpiar cabezales extrusores; el PLA se extruye hasta que el filamento extruido sale completamente transparente lo que quiere decir que ya no quedan restos de los gránulos, de color negro, en el cabezal. Puesto que la muestra 6

fue la primera pieza que se imprimió tras la limpieza, es muy probable que se imprimiera con una mezcla de PLA puro (empleado para la limpieza) y PLA + 48 % en volumen de WC/Ni lo que ha generado que la muestra esté compuesta principalmente por PLA con una cantidad de carga inorgánica muy reducida por lo que, al realizar la eliminación térmica del aglutinante, la muestra se ha carbonizado y ha colapsado. Casualmente la muestra 6 fue la que presentó un resultado más similar a las muestras impresas con PLA puro (**Figura 7.12-7.14**), lo que podría ser explicado por el hecho de que el PLA puro residual en el interior del barril del husillo ha permitido imprimir la pieza con un flujo de material más constante. Por lo tanto, se ha de tener especial cuidado a la hora de imprimir las primeras piezas justo después de la limpieza del cabezal extrusor asegurándose que este se encuentre completamente vacío del material de limpieza para evitar mezclas indeseadas que puedan afectar al resultado final de la pieza.

En las **Figuras 7.15 y 7.16** se puede observar que las muestras, exceptuando el ligero pandeo en la base y el colapso de algunos de sus bordes externos (este colapso se aprecia claramente en la muestra 4), no han presentado variaciones dimensionales considerables. El ligero pandeo sufrido por la pieza podría ser debido a una velocidad de enfriamiento demasiado elevada mientras que el colapso de los bordes de la base sería debido a errores de impresión (las zonas que han colapsado no presentaban la cohesión/dimensiones necesarias y no han sido capaces de mantener la integridad estructural durante el sinterizado). En la **Tabla 7.10** se presentan las dimensiones de las muestras 1 y 4 antes y después de su sinterización junto con su contracción. Antes de discutir estos resultados, se desea aclarar que los defectos dimensionales de las muestras han dificultado su correcta medición por lo que las dimensiones y los valores de contracción presentados son aproximados y deberán de ser estudiados en más detalle cuando se consigan imprimir muestras con menores defectos dimensionales. Se puede observar cómo las muestras han presentado contracciones similares tras la sinterización con un valor de entre 13,5 y 14,3 % para los lados y de entre 17,3 y 18,52 % para la altura; estos valores son cercanos a las contracciones que suelen presentar los materiales empleados en la MEAM-HP (15-20%) [16][38]. Las contracciones son ligeramente anisotrópicas siendo la altura la que ha presentado una mayor contracción. Tal y como se ha explicado en el **Apartado 2.4.8**, es común que las piezas impresas mediante MEAM-HP presenten mayores contracciones en el eje Z (altura en el caso de las muestras impresas en este estudio). Estas mayores contracciones son debidas a los pequeños vacíos que se forman entre las capas al depositar los filamentos [74].

Tabla 7.10. Dimensiones de las muestras 1 y 4 (WC/Ni) antes (muestra en verde) y después de sintetizar a 1400 °C durante 70 minutos junto con su contracción tras el sinterizado. L_1 y L_2 corresponden a las dimensiones de los lados y h a la altura.

	L_1 (mm)	L_2 (mm)	h (mm)	Contracción L_1 (%)	Contracción L_2 (%)	Contracción h (%)
Muestra 4 (en verde)	16,5	16,8	2,9	-	-	-
Muestra 4 (tras sinterizado)	14,2	14,4	2,4	13,8	14,3	17,3
Muestra 1 (en verde)	17	18,5	2,7	-	-	-
Muestra 1 (tras sinterizado)	14,7	16	2,2	13,5	13,5	18,52

Tal y como se ha explicado en el **Apartado 2.4.6**, en las piezas impresas mediante MEAM-HP, normalmente el aglutinante se elimina en dos pasos: un paso previo al ciclo térmico de debinding y sinterizado en donde se elimina, generalmente mediante un solvente, el componente principal del aglutinante y un segundo paso en donde se elimina térmicamente el resto del aglutinante (este segundo paso se suele realizar en el mismo ciclo térmico que el sinterizado). Las porosidades generadas tras la eliminación del componente principal del aglutinante permiten la salida de los gases que se generan al descomponer térmicamente los aglutinantes restantes. El fabricante de los gránulos empleados como materia prima afirma que la eliminación de todo el aglutinante se puede realizar térmicamente sin requerir del paso previo de eliminación mediante solvente del componente principal del aglutinante. Tras seguir esta recomendación y sintetizar las muestras eliminando todo el aglutinante térmicamente, en ninguna de estas se han observado ni deformaciones considerables ni el hinchamiento característico que sufren las piezas de MEAM-HP tras la sinterización cuando no se ha eliminado correctamente el componente principal del aglutinante en el paso previo al ciclo térmico de debinding y sinterizado (para más información sobre este hinchamiento véase **Apartado 2.4.6**). Por lo tanto, se cree que el aglutinante se ha eliminado de forma exitosa y que, tal y como afirma el fabricante de los gránulos, no sería necesaria una eliminación previa del componente principal del aglutinante antes de someter a la muestra al ciclo térmico de debinding y sinterizado. A pesar

de esto, se cree necesario continuar investigando la viabilidad de realizar la eliminación de todo el aglutinante en un único paso pues existe la posibilidad de que las porosidades que presentan las muestras estudiadas al haber sido impresa con un flujo irregular, hayan facilitado la salida de los gases generados al descomponerse el aglutinante. Por lo tanto, es posible que, en posteriores impresiones, cuando se logren imprimir piezas más densas, se puedan producir hinchamientos al no existir vía de escape para los gases generados durante el debinding térmico.

En la **Tabla 7.11** se presenta la densidad teórica aproximada del WC-5%Ni comparada con las densidades obtenidas mediante Arquímedes para las diferentes muestras sinterizadas (conociendo estas dos densidades ha sido posible obtener las porosidades, también reportadas en la misma tabla). Para las dos muestras sinterizadas se han obtenido unas porosidades medias de entre el 20,5 y el 24,1 %. Esta porosidad es esperable pues las muestras han sido impresas con un flujo de extrusión irregular. Otro factor que podría haber aumentado las porosidades sería el hecho de que la temperatura de sinterización no haya sido lo suficientemente elevada. La literatura recomienda temperaturas de sinterización de 1450 °C, pero, puesto que el horno empleado no era capaz de superar los 1400 °C, se tuvo que sintetizar a esta última temperatura; para piezas de WC-Ni sinterizadas a 1400 °C la literatura reporta porosidades de hasta el 22 % [114], lo que, sumado al flujo irregular de material, podría explicar las elevadas porosidades obtenidas. En la **Figura 7.17** se muestra una fotografía de la superficie de las muestras 1 y 4 tras su sinterizado y pulido en donde se pueden observar claramente las porosidades (marcadas con una flecha roja). En esta figura también se pueden observar claramente la geometría de algunos de los filamentos depositados (marcados con flechas amarillas), esto no debería de ser el caso y es un indicativo de que la unión entre los filamentos adyacentes no es la correcta.

Tabla 7.11. Densidades y porosidades obtenidas empleando el método de Arquímedes para las muestras 1 y 4 (WC/Ni) tras el sinterizado. *La densidad teórica ha sido aproximada empleando la regla de las mezclas suponiendo que el WC presenta un 5 % en volumen de Níquel.

	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
WC-5%Ni másico (teoría)*	~15,29	-
Muestra 4	12,15 ± 0,19	20,5 ± 1,3
Muestra 1	11,64 ± 0,17	24,1 ± 1,1

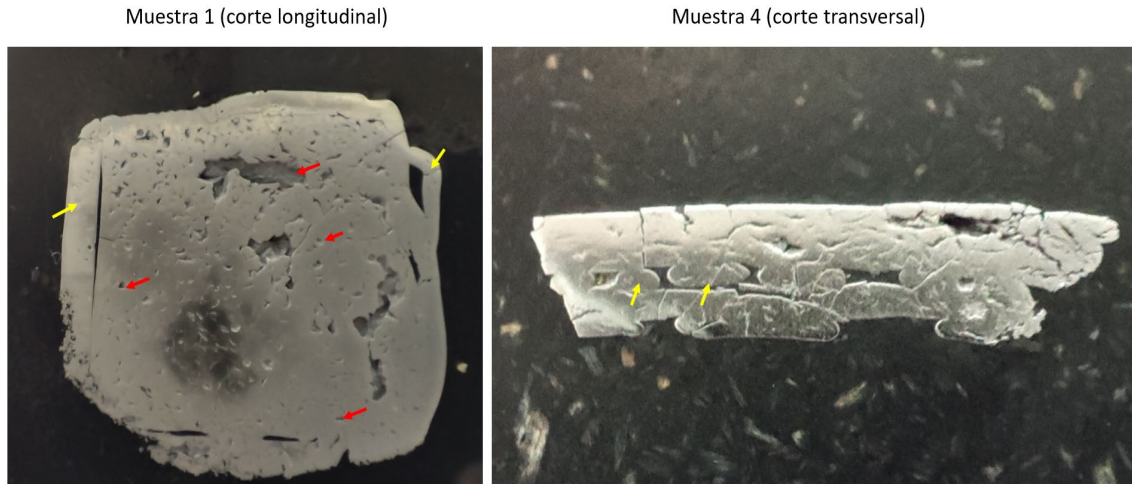


Figura 7.17. Superficie de la muestra 1 (corte longitudinal) y muestra 4 (corte transversal) tras el pulido (ambas muestras fabricadas con WC/Ni). Las flechas rojas indican porosidades mientras que las flechas amarillas señalan zonas en donde se pueden observar claramente los filamentos depositados.

7.2.6 Estudio mediante SEM-EDS de los gránulos y las muestras impresas

En la **Figura 7.18** se presenta una imagen de microscopía electrónica obtenida empleando electrones secundarios en donde se pueden observar los gránulos de PLA + 48% en volumen de WC/Ni a diferentes aumentos. Estos gránulos presentan una geometría más o menos redondeada (**Figura 7.18a-b**) y se puede apreciar que no son una masa continua de material si no que presentan pequeñas discontinuidades (**Figura 7.18c**, marcadas con una flecha roja) lo que puede llegar a causar defectos en el filamento extruido si no se realiza una adecuada fusión y compactación del material polimérico de los gránulos dentro del husillo. En la **Figura 7.18d** se pueden observar las partículas inorgánicas de WC/Ni rodeadas por el aglutinante (marcadas con una flecha amarilla), estas partículas se encuentran homogéneamente distribuidas y presentan una geometría esférica con un tamaño inferior a 7 μm , lo que se encuentra dentro de los tamaños de partícula recomendados por la literatura para la carga inorgánica empleada en la MEAM-HP; la literatura recomienda emplear polvos esféricos con tamaños inferiores a 20 μm pues, entre otras cosas, se mejora considerablemente el flujo de material y su sinterabilidad haciendo posible la obtención de piezas con una mayor homogeneidad microestructural, densidades y propiedades mecánicas además de menores distorsiones tras el sinterizado [14][37][55].

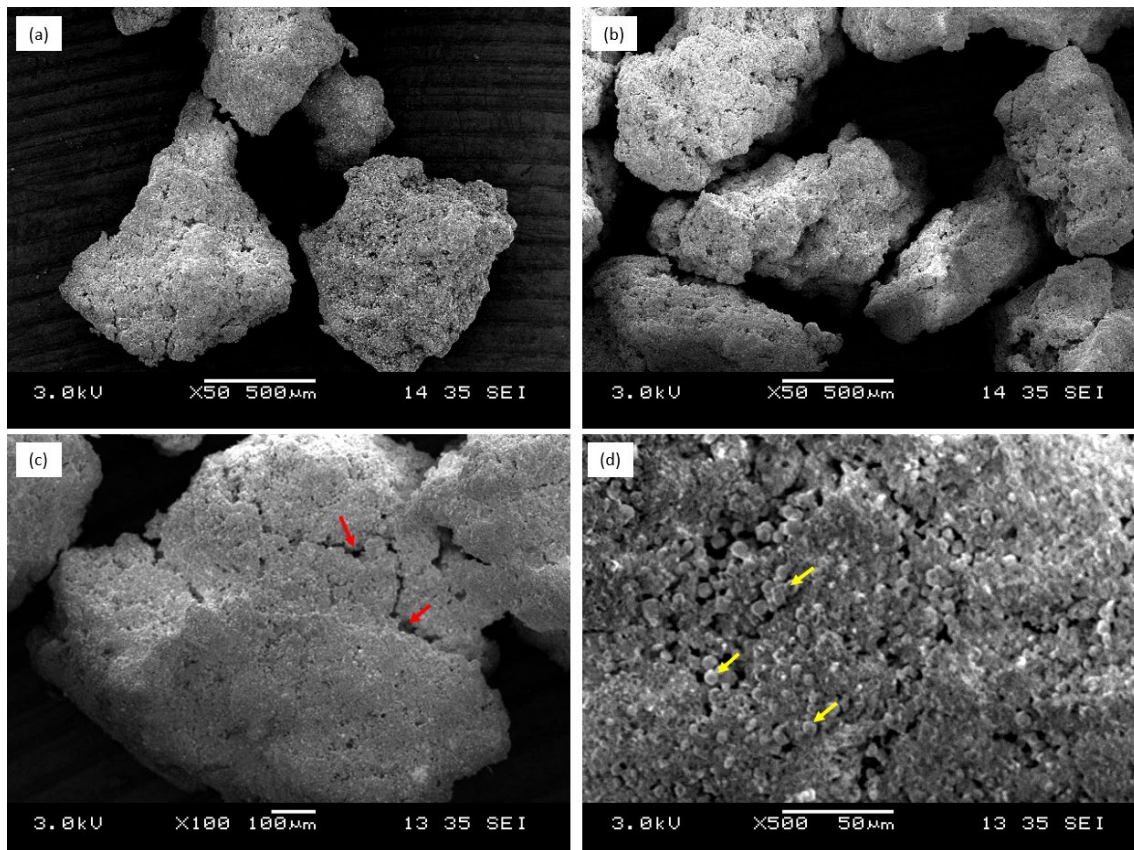


Figura 7.18. Imágenes de SEM obtenidas empleando electrones secundarios de los gránulos de PLA + 48% en volumen de WC/Ni a diferentes aumentos. Las flechas rojas señalan discontinuidades de material en los gránulos mientras que las flechas amarillas señalan las partículas inorgánicas de WC/Ni.

En la **Figura 7.19** se presentan varias imágenes de microscopía electrónica obtenidas empleando electrones secundarios en donde se puede observar la superficie de la muestra 1 (impresa con PLA + 48 % en volumen de WC/Ni) antes de su sinterizado (muestra en verde) a diferentes aumentos. En esta figura se puede apreciar que los filamentos extruidos no se encuentran unidos entre ellos (**Figura 7.19a-b**), además de que presentan variaciones dimensionales a lo largo de su longitud (**Figura 7.19a**) y algunos defectos superficiales (**Figura 7.19c**, marcados con una flecha roja); esto no es deseable y sería debido a un flujo insuficiente e irregular durante la extrusión de los filamentos. A pesar de esto parece ser que las partículas inorgánicas se encuentran uniformemente distribuidas a lo largo de los filamentos (**Figura 7.19d-f**), por lo que no se han producido heterogeneidades durante la extrusión de los filamentos que puedan afectar a su sinterabilidad. Por último, se observa que los filamentos extruidos presentan microrugosidades (**Figura 7.19d-e**) lo que es algo característico de la MEAM-HP al imprimir las piezas sin aplicar ningún tipo de contrapresión considerable sobre el material (como sí que es el caso en la técnica PIM) [72]. Por lo tanto, será necesario realizar un posprocesado a la pieza impresa si se desea reducir estas rugosidades.

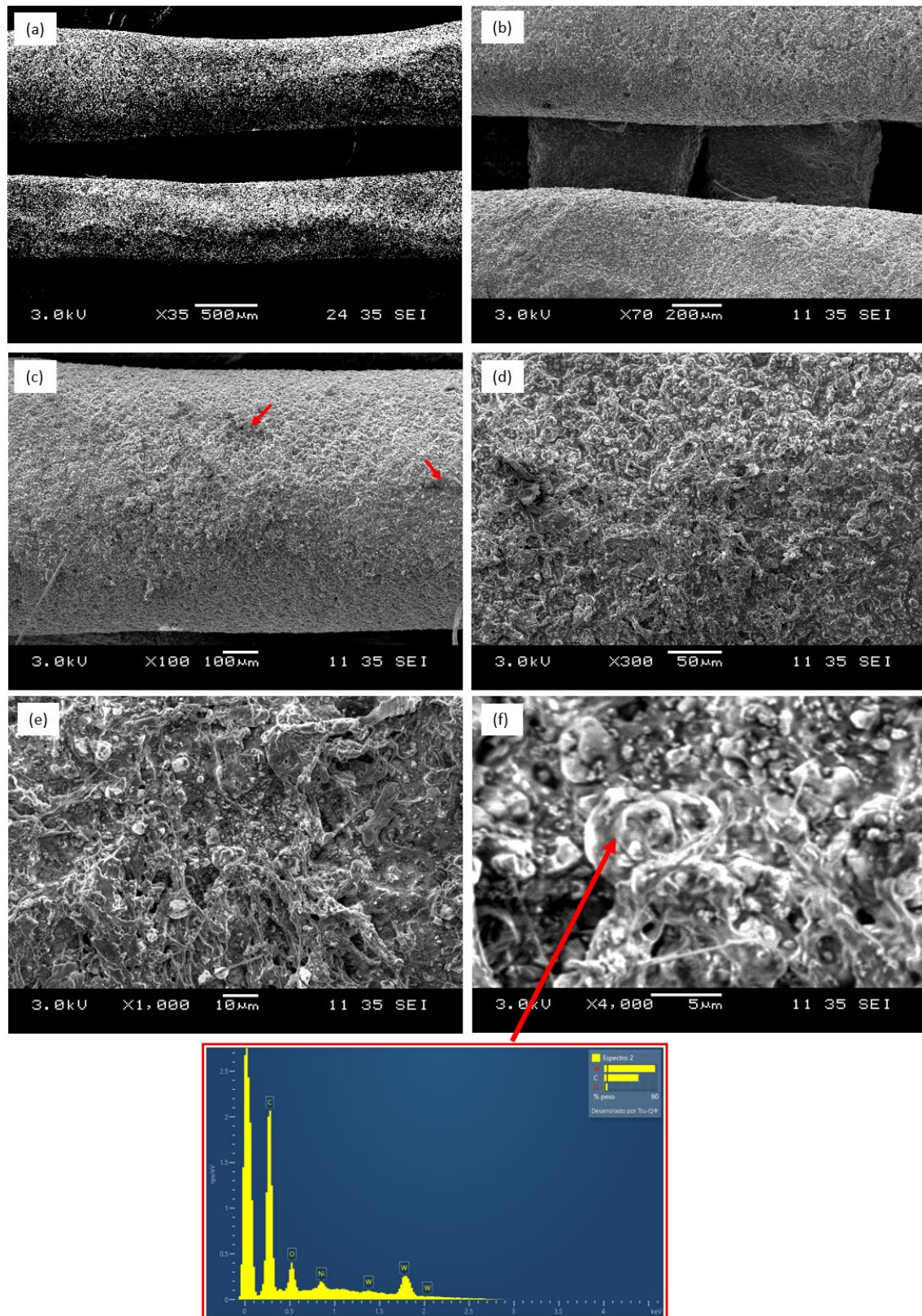


Figura 7.19. Imagen de microscopía electrónica obtenida empleando electrones secundarios en donde se puede observar la superficie de la muestra 1 (impresa con PLA + 48 % en volumen de WC/Ni) antes de su sinterizado (muestra en verde) a diferentes aumentos. En (c) las flechas rojas señalan defectos en un filamento depositado mientras que el espectro de rayos x de (f) indica que la partícula esférica está compuesta por WC/Ni.

En la **Figura 7.20** se presentan imágenes de microscopía electrónica obtenidas empleando electrones secundarios en donde se puede observar, a diferentes aumentos, la topología superficial y microestructura de la muestra 1 (impresa con PLA + 48 % en volumen de WC/Ni) tras su sinterizado. Se puede apreciar claramente que la muestra presenta porosidades considerables y, se cree, existen 2 tipos de porosidades. El primer tipo son porosidades con tamaños relativamente grandes ($> 3 \mu\text{m}$) (marcadas con flechas rojas) generadas durante el proceso de impresión de la muestra. Los principales causantes de estas porosidades serían el flujo irregular de material, parámetros de impresión inadecuados y la falta de compresión (al contrario que en la PIM, en la MEAM-HP no se aplica presión durante la fabricación de la muestra por lo que el material que conforma la muestra se encontrará mucho menos compactado [72]). Otro fenómeno que podría haber causado estas porosidades es una cantidad de carga inorgánica insuficiente en la materia prima. Para la materia prima empleada en la MEAM-HP se recomiendan porcentajes en volumen de carga inorgánica de alrededor del 60 % [61-63], en el caso de los gránulos de PLA + WC/Ni empleados en este estudio, la cantidad de carga inorgánica es del 48 %, por lo que es probable que esta no sea lo suficientemente elevada como para garantizar una correcta sinterización generándose las porosidades. El segundo tipo de porosidades son porosidades mucho más pequeñas ($< 0,5 \mu\text{m}$) (marcadas con flechas amarillas) las cuales presentan una geometría alargada y se encuentran confinadas alrededor de los puntos triples de los granos, lo que podría indicar que estas porosidades serían provocadas por un ciclo térmico de sinterizado inadecuado (la literatura reporta porosidades del 22 % para las temperaturas de sinterización empleadas y afirma que se pueden reducir hasta un 1 % al aumentar la temperatura hasta 1450°C [114], pero tal y como se ha explicado en el **Apartado 6.6**, debido a limitaciones del horno, no fue posible alcanzar los 1450°C).

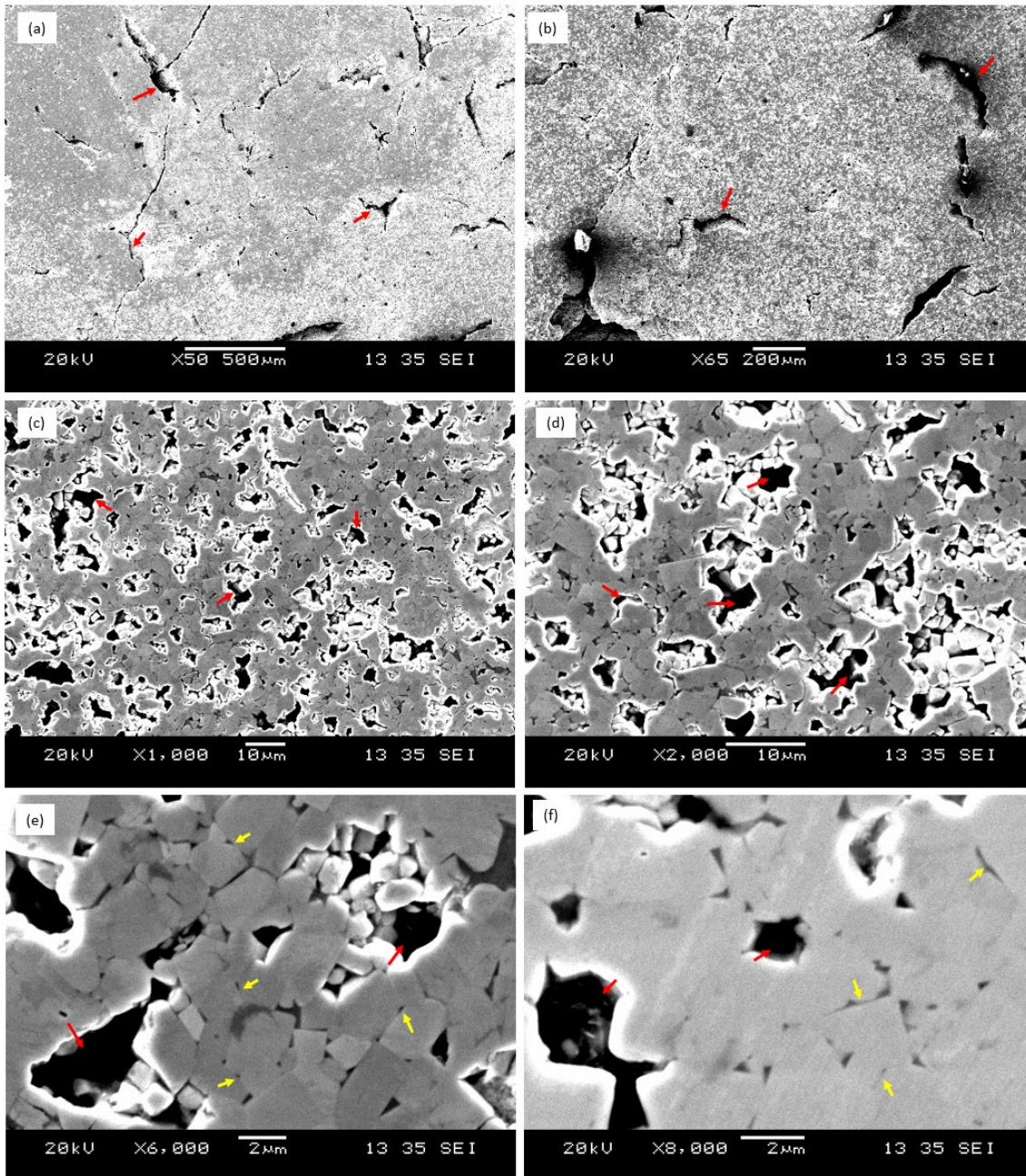


Figura 7.20. Imágenes de microscopía electrónica obtenidas empleando electrones secundarios en donde se puede observar la topología superficial y microestructura de la muestra 1 (impresa con PLA + 48 % en volumen de WC/Ni) tras su sinterizado. Las flechas rojas señalan las porosidades que se habrían generado durante el proceso de impresión mientras que las flechas amarillas señalan las porosidades que se habrían generado debido a unos parámetros de sinterización inadecuados.

El estudio mediante SEM-EDS de la superficie de las muestras de WC/Ni tras el sinterizado (**Figura 7.21**) demostraría que, todo y las porosidades, se ha obtenido una masa continua de material sin rastros aparentes del aglutinante compuesta de W, C y pequeñas cantidades de Ni rodeando al W, lo que coincide con la composición esperada (WC-5%Ni). Por lo tanto, se cree

que el proceso de eliminación del aglutinante y sinterizado se ha realizado de forma exitosa y que, una vez solucionado el problema del flujo de material y optimizados los parámetros de impresión y de sinterización sería posible obtener muestras mucho más densas.

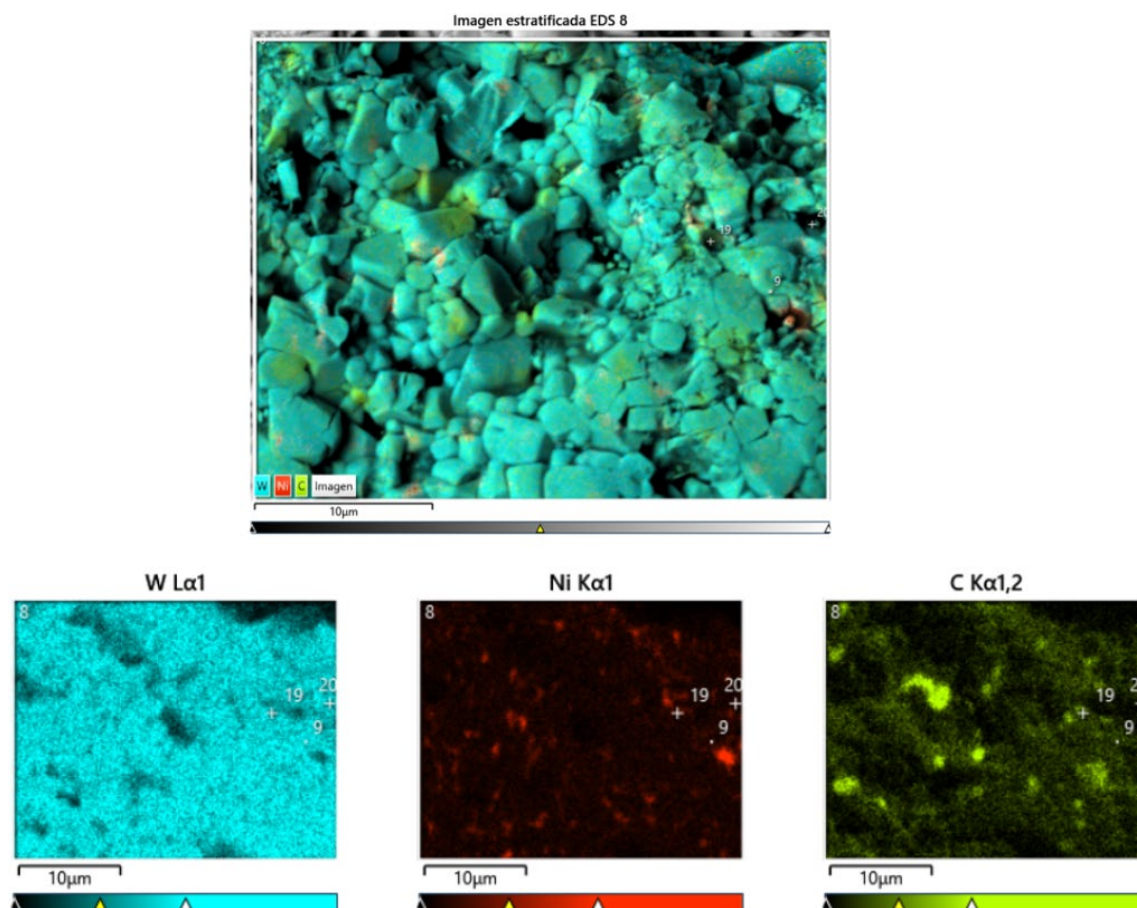


Figura 7.21. Mapping obtenido mediante SEM-EDS de la composición elemental de la superficie de la muestra 1 tras el sinterizado (muestra impresa empleando los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni).

8. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El proyecto VIVALDI, y por consiguiente este trabajo, nace de la necesidad de revalorizar residuos metálicos y cerámicos mediante la generación de nuevas materias primas para su uso en procesos como la fabricación aditiva. Por lo tanto, este trabajo promueve el cierre del ciclo de vida de los recursos contribuyendo de esta forma a una de las principales iniciativas europeas: la implementación de una economía circular. En junio de 2020 se aprobó el documento *España Circular 2030* que define los principales objetivos a lograr en los próximos años a nivel nacional para lograr una transformación real hacia una economía circular [4]. En la **Tabla 8.1** se presenta la contribución de este trabajo para lograr los objetivos.

Tabla 8.1. Principales objetivos a alcanzar en los próximos años a nivel nacional para lograr una transformación real hacia una economía circular en los que contribuye este trabajo.

Objetivos España circular 2030	Contribución de este trabajo
Reducir en un 30 % el consumo nacional de materiales en relación con el PIB, tomando como año de referencia el 2010.	Incorporación de partículas metálicas y cerámicas provenientes de residuos industriales en la producción de gránulos que puedan ser empleados como materia prima para impresión 3D.
Reducir la generación de residuos un 15 % respecto de lo generado en 2010.	Se aborda este objetivo desde dos puntos: i. Reciclado de residuos industriales para la generación de materiales. ii. Aplicación de la tecnología de impresión 3D que tiene una alta eficiencia con el uso del material y genera menos residuos respecto a los procesos de manufactura tradicional.
Reducir la emisión de gases de efecto invernadero por debajo de los 10 millones de toneladas (Mt) de CO ₂ eq.	Al emplear material reciclado como materia prima para la impresión 3D de piezas se disminuyen las emisiones de CO ₂ a través de: i. No consumir materia prima extraída de fuentes naturales y por lo tanto no se generan las emisiones producidas por la extracción, refinado y transporte de dichos materiales. ii. Uso de nuevas tecnologías (impresión 3D y atomización centrífuga) más eficientes energéticamente.

Bureau of International Recycling publicó en 2016 el “*Report on the Environmental Benefits of Recycling*”, un informe en donde se demuestra que la sustitución de materias primas por materiales reciclados, en la mayoría de los casos, supone un ahorro de emisiones de CO₂ de entre el 58 y el 99 % [126]. En la **Tabla 8.2** se presentan las emisiones que, se estima, se generarían para obtener 1 kg de cada uno de los materiales que componen la materia prima empleada en este estudio (el fabricante de los gránulos emplea polvo inorgánico reciclado y PLA virgen proveniente de materia prima renovable, como, por ejemplo, maíz o caña de azúcar). En esta misma tabla se presentan las emisiones que se generarían al obtener los materiales de fuentes naturales (virgen); la estimación de las emisiones se ha realizado consultando varios *life cycle assessments* sobre los diferentes materiales [126-130]. Se desea aclarar que, si bien el aglutinante está formado por varios polímeros, puesto que el PLA supone un porcentaje en peso superior al 93 % y para facilitar el cálculo de las emisiones, se ha considerado que el aglutinante está únicamente compuesto de PLA. En la **Tabla 8.2** se observa que, para obtener los materiales reciclados, las emisiones se reducen entre un 69,7 y un 90 %. En la **Tabla 8.3** se presentan las emisiones totales que, se estima, se han generado para obtener la cantidad de materia prima empleada en este trabajo y se comparan con las emisiones que se generarían si se hubiera empleado material no reciclado (virgen). Se puede observar que, para obtener la materia prima empleada en este trabajo, se generan un 81,2 % menos de emisiones que si esta fuera obtenida empleando material no reciclado.

Tabla 8.2. Emisiones estimadas para obtener 1 kg de los diferentes materiales que componen la materia prima empleada en este trabajo [126-130].

	Aglutinante	Carga inorgánica		
	PLA	Ti6Al4V	Grafito	WC/Ni
Virgen (Kg CO ₂ eq)	0,5	46,5	5,4	69
Reciclado (Kg CO ₂ eq)	-	5,2	0,5	14
(% reducción emisiones)	-	78,8	90	69,7

Tabla 8.3. Emisiones totales estimadas para obtener la cantidad de materia prima empleada en este trabajo (material reciclado, verde) comparado con las emisiones que se generarían al emplear material no reciclado (virgen, naranja).

	PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V	PLA + 20 % en volumen de Grafito	PLA + 48 % en volumen de WC/Ni	Total
Peso materia prima (g)	100	100	200	400
Peso carga inorgánica (g)	76	69	183,4	328,4
Peso aglutinante polimérico (g)	24	31	16,6	71,6
Emisiones producción carga inorgánica virgen (Kg CO₂eq)	3,5	0,4	12,6	16,5
Emisiones producción carga inorgánica reciclada (Kg CO₂eq)	0,4	0,04	2,6	3
Emisiones producción aglutinante polimérico (Kg CO₂eq)	0,01	0,02	0,01	0,04
Emisiones producción materia prima virgen (Kg CO₂eq)	3,5	0,4	12,6	16,5
Emisiones producción materia prima reciclada (Kg CO₂eq)	0,4	0,05	2,6	3,1

La intensidad de carbono de la red eléctrica española a día 22 de mayo de 2022 es de 0,11 kgCO₂eq/kWh [131]. Sin considerar el consumo eléctrico de las instalaciones en donde se ha

realizado este trabajo (luces, climatización...), el consumido durante la fabricación de la impresora AIMPLAS ni el consumido por el microscopio electrónico (no se tienen datos suficientes para poder calcular estos consumos), se estima que el consumo eléctrico de la diferente maquinaria empleada ha sido de 290,8 kWh lo que supondría unas emisiones de 31,7 Kg de CO₂eq (para más detalles sobre cómo se ha obtenido el consumo energético véase el Apartado de **Análisis Económico**).

En cuanto al argón empleado como atmósfera protectora durante la sinterización, no se conocen efectos adversos causados por este; el argón es un gas extremadamente inerte, no tóxico, ni inflamable generado de forma natural en el medio ambiente y que se dispersa rápidamente en zonas bien ventiladas [20].

El principal elemento empleado en el aglutinante es el PLA. Este es un polímero biodegradable que se obtiene de fuentes renovables por lo que es una alternativa adecuada para el medioambiente (**Figura 8.1**) [130]. Todo y esto, se ha de considerar que el PLA se ha de eliminar térmicamente para obtener la pieza final. Varios estudios han demostrado que durante la eliminación térmica del PLA se generan compuestos orgánicos volátiles que pueden ser tóxicos para los humanos [132]. Por lo tanto, la eliminación del PLA debe de realizarse en un ambiente controlado para evitar la inhalación de estos compuestos y su dispersión en el medio ambiente.

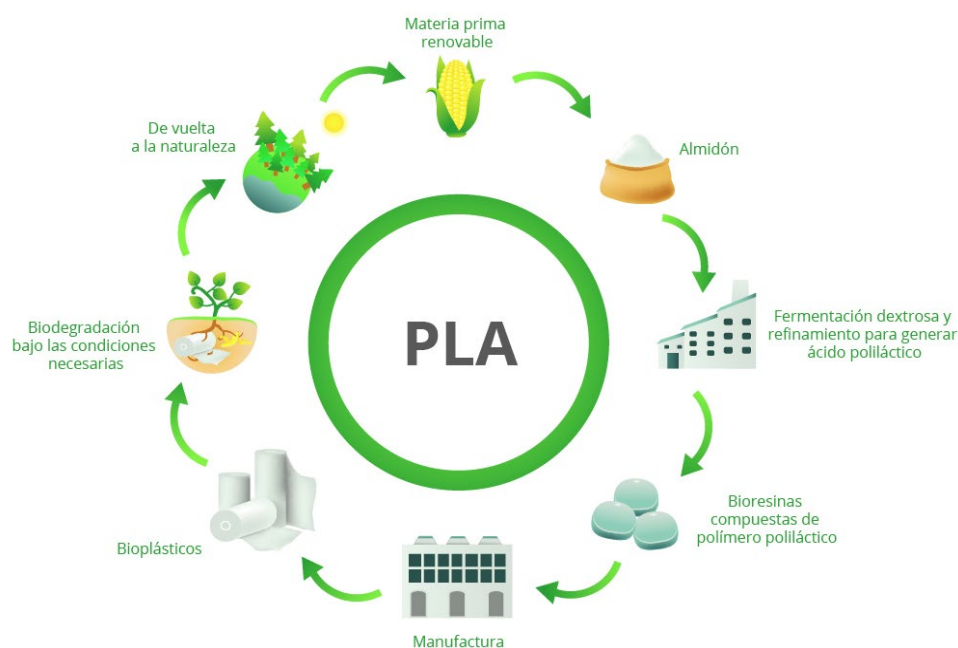


Figura 8.1. Ciclo de vida del PLA. (Fuente: Trading Films).

La tecnología de impresión 3D aunque ya se está introduciendo en algunos mercados como una alternativa real a los procesos tradicionales, aún no es una solución 100% en todos los sectores y por lo tanto no se dispone de un análisis definitivo sobre su impacto medioambiental real. En cualquier caso, sí que existen unos primeros estudios que indican que la implementación de esta nueva tecnología puede suponer una reducción estimada de 60 Mt de emisiones de CO₂ al año. La impresión 3D es más eficiente energéticamente y crea mucho menos material de desecho por unidad producida que otras técnicas de fabricación convencionales (**Figura 8.2**). Por ejemplo, mediante mecanizado la producción típica puede involucrar 100 kg de metal para hacer una pieza de 3 kg, mientras que la impresión en 3D solo requiere de 3,5 kg para el mismo artículo [4]. Además, varios estudios han estudiado la posibilidad de reutilizar material de desecho generado durante la impresión de piezas mediante MEAM-HP y se ha concluido que es posible añadir una pequeña cantidad de material de desecho a la materia prima sin afectar las dimensiones, densidad y propiedades mecánicas de las piezas impresas (la cantidad de material de desecho que se pueda añadir dependerá de la composición de la materia prima) [133]. Puesto que la materia prima empleada en este estudio se encuentra en forma de gránulos, simplemente bastaría con moler el material de desecho y mezclarlo en la proporción adecuada con el resto de la materia prima. En el caso de que el material de desecho no pueda ser reaprovechado, la carga inorgánica se podría recuperar empleando un disolvente que disuelva el aglutinante (el fabricante afirma que el aglutinante es biodegradable y que este se disuelve en agua).

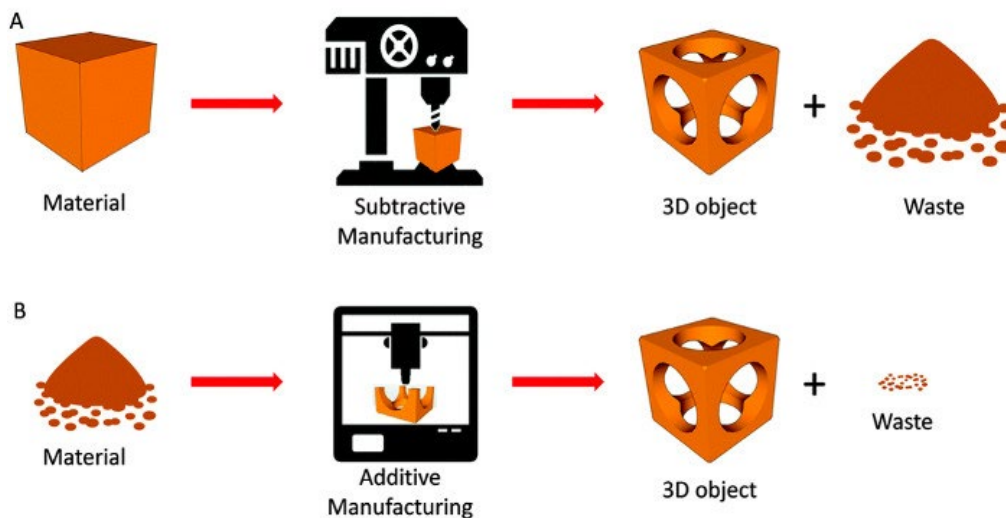


Figura 8.2. Imagen esquemática comparando los residuos generados al fabricar una pieza por métodos convencionales de mecanizado sustractivo y los residuos generados al emplear manufactura aditiva (impresión 3D) [134].

CONCLUSIONES

Sobre los gránulos empleado como materia prima y diseño de la tolva:

- La observación de los gránulos suministrados por Colfeed mediante SEM ha demostrado que las partículas inorgánicas se encuentran homogéneamente distribuidas en el aglutinante y que estas presentan una geometría y tamaño adecuados para ser empleadas en la técnica MEAM-HP.
- Los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni son los que presentan una geometría más irregular junto con un mayor tamaño medio de partícula y una distribución del tamaño de partícula más ancha debido a su menor tiempo de molienda. Mayores tiempos de molienda dan lugar a partículas más esféricas con menores tamaños y distribuciones más estrechas.
- Los diferentes gránulos estudiados presentan ángulos de reposo entre 29,8 y 36,3 °, siendo los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni los que presentan el mayor ángulo de reposo. El incremento del ángulo de reposo se vería fomentado por mayores tamaños de partícula y geometrías menos esféricas. Además, gránulos con los tamaños de partícula muy pequeños, como en el caso de los gránulos de PLA + 47 % en volumen de Ti6Al4V, pueden exhibir cohesión debido al efecto electrostático y su mayor capacidad de absorber humedad, lo que aumenta el ángulo de reposo.
- La similitud en los resultados obtenidos al medir un polvo de referencia empleando el embudo de Carney impreso en 3D y un embudo de Carney comercial demuestra que el embudo de Carney impreso en 3D podría ser una herramienta válida para estudiar la fluidez de los gránulos.
- Los resultados de flujo de Carney obtenidos indican que los gránulos de PLA + 48 % en volumen de WC/Ni son los que presentan una mayor fluidez debido su mayor tamaño medio de partícula, gravedad específica y relación densidad aparente/densidad másica (promovida por su distribución del tamaño de partícula bimodal). Por otro lado, el flujo de los gránulos se mejora ligeramente tras un secado a 60 °C durante 10 minutos lo que se debe a su pérdida de humedad y disminución de su cohesión.

- Mediante el estudio de la geometría, distribución del tamaño de partícula y ángulo de reposo de los gránulos ha sido posible diseñar una tolva apta para los gránulos de PLA + WC/Ni y PLA + grafito (ambos con flujo másico). En cuanto al flujo de los gránulos de PLA + Ti6Al4V, estos presentan dificultades para fluir a través de la tolva sin agitación lo que sería debido a su menor tamaño de partícula, lo que reduce su densidad aparente e incrementa el efecto de las fuerzas electrostáticas y la adsorción de la humedad aumentando la cohesión de los gránulos y la probabilidad de atoramientos en la tolva. Por lo tanto, se recomienda evitar usar gránulos con tamaños máximos inferiores a 1 mm.
- Los resultados de fluidez de los gránulos a través de la tolva se correlacionan con los resultados obtenidos en el ensayo de Carney, demostrando que el ensayo de Carney sería válido para el estudio de la fluidez de los gránulos.

Sobre el estudio de los parámetros de impresión:

- El flujo de extrusión observado al extruir los gránulos de PLA + carga inorgánica, independientemente de la temperatura y shear rate aplicados, ha sido extremadamente irregular. Esto sería debido a una insuficiente alimentación de material al husillo causada por la generación de agujeros de rata alrededor de este. Se recomiendan varias soluciones para intentar resolver esta problemática: (1) Aumentar el tamaño de partícula de los gránulos para que tengan un tamaño medio de unos 3 mm (similar al de los pellets de PLA) de forma que el husillo tenga una mayor facilidad para agarrarlos. (2) Mejorar el sistema de alimentación de forma que los gránulos, tras pasar por la tolva, caigan directamente entre los filetes del husillo de una forma similar a lo que sucede con los husillos colocados en horizontal empleados en extrusión de polímeros. (3) Aplicar agitación durante la impresión para hacer colapsar los agujeros de rata que se forman. (4) Disminuir la temperatura en la zona de alimentación más cercana a la garganta de la tolva para fomentar la descohesión del material y evitar la formación de agujeros de rata. (5) Rediseñar el husillo de forma que sea capaz de agarrar los gránulos de forma más efectiva.

- Los gránulos de WC/Ni son los que han presentado un flujo de materia extruido menos irregular debido a su mayor tamaño medio de partícula, lo que facilita a la tolva y al husillo el transporte de los gránulos al interior del barril.
- Debido al flujo irregular obtenido al extruir los gránulos, no ha sido posible imprimir muestras con la repetibilidad suficiente como para poder realizar un correcto estudio de los parámetros de impresión.
- El flujo de material extruido para los gránulos de PLA + carga inorgánica presentaría una tendencia polinómica creciente de orden 4 al incrementar la temperatura debida a la adición de las partículas inorgánicas lo que da lugar a interacciones físicas y químicas (pseudoenredos) entre las cadenas poliméricas del aglutinante y las partículas inorgánicas modificadas. El rango de temperatura de extrusión óptimo se encontraría entre 150 - 210 °C ya que este es el rango en donde se podría obtener un control más óptimo del flujo reduciéndose la posibilidad de atascos en la boquilla.
- 180-200 °C es el rango de temperatura de extrusión que ha dado mejores resultados durante la impresión de las muestras independientemente del tipo de gránulo extruido. Temperaturas inferiores a 180 °C reducen considerablemente el flujo de material y la adhesión de los filamentos, además de requerir una mayor velocidad de giro del husillo para alcanzar el flujo deseado lo que aumenta la probabilidad de que este se bloquee. A temperaturas superiores a 200 °C se comienza a producir una disminución excesiva de la viscosidad del material lo que puede llegar a afectar negativamente a las dimensiones del filamento extruido. A temperaturas de alrededor de 220 °C se iniciaría la degradación del aglutinante.

Sobre las muestras impresas:

- Todo y el flujo irregular, se han logrado imprimir muestras en verde de PLA + 48 % en volumen de WC-5%Ni con dimensiones relativamente similares entre ellas en los lados (desviaciones estándar de entre 0,9 y 1,3 mm) pero con alturas insuficientes debido a que el flujo irregular obligaba a detener las impresiones. La precisión dimensional se podría aumentar optimizando los parámetros de impresión y mejorando el flujo de material extruido.

- El estudio mediante SEM de las muestras en verde revela que los filamentos extruidos no se encuentran completamente unidos entre ellos y presentan variaciones dimensionales a lo largo de su longitud junto con algunos defectos superficiales, lo que sería debido a un flujo insuficiente e irregular durante su extrusión. A pesar de esto parece ser que las partículas inorgánicas se encuentran uniformemente distribuidas a lo largo de los filamentos, por lo que no se han producido heterogeneidades durante la extrusión de los filamentos que puedan afectar a su sinterabilidad. Por último, se observa que los filamentos extruidos presentan microrugosidades, por lo tanto, será necesario un posprocesado si se desea mejorar el acabado superficial de la pieza.
- Tras el debinding y sinterizado, las muestras no han sufrido variaciones dimensionales considerables ni defectos relacionados con una eliminación incorrecta del aglutinante lo que indicaría que la eliminación del aglutinante y el sinterizado se ha realizado con éxito.
- Las contracciones tras el sinterizado observadas son ligeramente anisotropías con un valor de entre 13,5 y 14,3 % para los lados y de entre 17,3 y 18,52 % para la altura. Estos valores se encuentran dentro de las contracciones esperadas.
- Para las muestras sinterizadas se han obtenido unas porosidades medias de entre el 20,5 y el 24,1 %. Esta porosidad se podría reducir considerablemente mejorando el flujo de material extruido y optimizando los parámetros de impresión y de sinterización.
- El estudio mediante SEM-EDS de la superficie de las muestras sinterizadas ha demostrado que, todo y las porosidades, se ha obtenido una masa continua de material sin rastros aparentes del aglutinante compuesta de W, C y pequeñas cantidades de Ni rodeando al W, lo que coincide con la composición esperada (WC-5%Ni). Por lo tanto, se cree que el proceso de eliminación del aglutinante y sinterizado se ha realizado de forma exitosa y que, una vez solucionado el problema del flujo de material y optimizados los parámetros de impresión y de sinterización sería posible obtener muestras mucho más densas.

Sobre el impacto medioambiental:

- Se estima que la electricidad consumida durante la elaboración de este trabajo ha sido de 290,8 kWh (equivalente a 31,7 Kg de CO₂eq). Por otro lado, las emisiones relacionadas con la obtención de la materia prima empleada se estiman en 3,1 kg de CO₂eq; al utilizar carga inorgánica reciclada se habrían reducido las emisiones en un 81,2 %.
- El PLA (principal componente del aglutinante) es biodegradable siendo una alternativa adecuada para el medioambiente. Todo y esto, se ha de tener especial cuidado durante su eliminación térmica pues al descomponerse se generan compuestos orgánicos volátiles perjudiciales para la salud. Por lo tanto, se recomienda realizar la eliminación del PLA en un ambiente controlado para evitar la inhalación de estos compuestos y su dispersión en el medio ambiente.
- El uso de la manufactura aditiva permite reducir considerablemente el consumo energético y el material de desecho (con reducciones del material de desecho de hasta el 99,5%).
- Puesto que la materia prima empleada en este estudio se encuentra en forma de gránulos, sería posible reaprovechar el material de desecho triturándolo para generar nuevos gránulos que puedan ser mezclados con la materia prima “virgen”. En el caso de que el material de desecho no pueda ser reaprovechado, la carga inorgánica se podría recuperar empleando agua para biodegradar el aglutinante.

TAREAS POR REALIZAR EN FUTUROS ESTUDIOS

A continuación, se presenta una lista con las tareas que, se cree, serían interesantes realizar en futuros estudios.

- Rediseñar el sistema de alimentación/husillo del cabezal extrusor para facilitar que los gránulos puedan ser introducidos de forma constante hacia el interior del barril lo que, se cree, mejoraría considerablemente el flujo de material extruido.
- Tras obtener un flujo constante de material extruido, optimizar los parámetros de impresión, eliminación del aglutinante y de sinterizado para fabricar piezas completamente densas de forma repetible sin variaciones dimensionales considerables y con las mejores propiedades mecánicas posibles.
- Estudiar la viabilidad de realizar la eliminación de todo el aglutinante térmicamente saltándose el paso previo de eliminación del componente principal del aglutinante mediante solvente.
- Cuando se esté satisfecho con las piezas obtenidas, realizar la impresión de probetas y realizar ensayos para obtener sus propiedades mecánicas (por ejemplo, ensayos de tracción, tenacidad o durezas)
- Estudiar la viabilidad de triturar los desechos generados durante la impresión para obtener nuevos gránulos que puedan volver a ser aprovechados como materia prima.

ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se presenta el cálculo aproximado de la adquisición y uso de todos los elementos empleados durante la realización del presente trabajo (**Tablas AE.1-AE.3**). Se desea aclarar que el coste de la impresora 3D empleada para fabricar las muestras tiene un coste de mercado aproximado de 44.000 €, lo que aumenta enormemente el coste del proyecto. Su elevado coste es debido a que la impresora consta de 5 cabezales de los cuales solo se ha empleado el cabezal de pellets, por lo tanto, las mismas muestras se podrían haber impreso empleando un sistema mono cabezal de impresión más barato. El fabricante Tumaker vende un sistema de impresión más pequeño y compacto con el mismo cabezal de pellets que el empleado en este trabajo por unos 5.000 €, por lo tanto, se ha considerado este precio. En cuanto a los gránulos empleados como materia prima, estos se encuentran aún en estado experimental y por lo tanto no tiene un precio de mercado, aun así, el fabricante (Colfeed) vende unos filamentos con una composición similar a la de los gránulos por un precio aproximado de 5 €/g. En cuanto al precio de la energía consumida se ha considerado un precio de 0,2 €/kWh.

Tabla AE.1. Coste estimado de obtención/uso para cada una de las máquinas empleadas en este trabajo.

Maquinaria	Precio (€)	Precio por horas (€/h)	Consumo energético (kWh)	Cantidad de horas usado (h)	Consumo energético total (kWh)	Precio de la energía gastada (€)	Precio total (€)
Impresora 3D + Cabezal extrusor de husillo	5.000	-	0,5	20	10	20	5.020
Horno de tubo Hobersal ST-16	11.000	-	7	18	126	25,2	11.025,2
Pulidora Buehler	2.500	-	0,55	6	3,3	0,66	2.500,66

Encastadora Struers Labopress - 3	2.500	-	1,5	1	1,5	0,15	2.500,15
SEM	-	100	-	3	-	-	300
Balanza de precisión Kern EMB-V	625	-	0,02	2	0,04	0,01	625,1
Microscopio óptico industrial 38 MP FHD camera V6	100	-	0,01	8	0,01	0,01	100,1
Impresora 3D SLS	-	100	-	10	-	-	1.000
Ordenador	1.500	-	0,3	500	150	30	1.530
Total							24.601 €

Tabla AE.2. Coste estimado del material empleado en este trabajo.

Material	Cantidad (Unidades, Kg, l)	Precio unitario [€/ (u, kg, l)]	Precio final (€)
Gránulos de PLA + carga inorgánica	0,2	5.000	1.000
Boquilla para el cabezal extrusor de pellets	1	20	20

Pie de rey	1	15	15
Disco magnético para pulido	1	16	16
Set de papel abrasivo (tamaño de grano: 80, 240, 400, 600, 1200 y 2400)	1	20	20
Paño de pulido	4	5	20
Set pasta de diamante (9,6,3 y 1 μm)	1	150	150
Software de diseño SolidWorks	1	950	950
Etanol	1,5	5	7,5
Jabón	1	2,5	2,5
Agua	11	0,002	0,02
Baquelita	0,2	15	3
Equipamiento de laboratorio (vasos de precipitados, gafas protectoras, guantes, papel...)	1	200	200
Material de taller (tornillos, tuercas, brocas, taladros...)	1	1.000	1.000
Material de oficina (lápices, bolígrafos, hojas...)	1	100	100
Total			3.504,1 €

En la **Tabla AE.3** se muestran los sueldos de los trabajadores que han tomado parte en este estudio junto con el coste total que han supuesto. Se ha considerado que el projectista recibe un sueldo de ingeniero junior.

Tabla AE.3. Coste estimado del personal que ha participado en el proyecto.

Trabajador	Precio hora (€/h)	Horas totales (h)	Precio total (€)
Ingeniero junior	18	700	12.600
Director de proyecto	33	20	660
Técnico de laboratorio	15	17	255
Total			13.514 €

Coste total del proyecto	41.619,31 €
---------------------------------	--------------------

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Página web de CIM UPC. Accesible en: <https://www.fundaciocim.org/>. Accedida el 18/04/2022.
- [2] Olivares, D. (18 marzo 2020). *"CIM UPC presenta una agrupación de empresas emergentes para potenciar la I+D+i y la impresión 3D"*. MuyPymes. Accesible en: <https://www.muypymes.com/2020/03/18/cim-upc-presenta-una-agrupacion-de-empresas-emergentes-para-potenciar-la-idi-y-la-impresion-3d>. Accedida el 18/04/2022.
- [3] MarketsandMarkets. (2020). *"3D Printing Metals Market by Form, Technology, Metal Type, End-Use Industry & Geography - Global Forecast to 2024"*.
- [4] Centro para el desarrollo tecnológico industrial (CDTI). (2021). *"Valorización de residuos cerámicos y metálicos mediante generación de polvo para fabricación aditiva y otras aplicaciones de alto valor añadido"*
- [5] Gonzalez-Gutierrez, J. et al. (2018). *"Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives"*, Materials 2018, Vol. 11, p. 840. doi:10.3390/MA11050840.
- [6] German, R.M. (1996). *"Sintering Theory and Practice"*. John Wiley & Sons, New York, USA. ISBN: 978-0-471-05786-4
- [7] Valencia, J.J. et al. (2012). *"Sintering Effect on the Microstructure and Mechanical Properties of Alloy 718 Processed by Powder Injection Molding"*, Superalloys, pp. 753–762. doi:10.7449/1997/superalloys_1997_753_762.
- [8] Johnson, J.L. et al. (2004). *"Mechanical properties and corrosion resistance of MIM Ni-based superalloys"*, Proceedings of the 2004 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Vol.4, pp. 89–101.
- [9] Atre, S. V., Weaver, T.J. and German, R.M. (1998). *"Injection molding of metals and ceramics"*, SAE Technical Papers. doi:10.4271/982417.
- [10] Wolff, M. et al. (2016). *"Metal Injection Molding (MIM) of Magnesium and Its Alloys"*, Metals 2016, Vol. 6, p. 118. doi:10.3390/MET6050118.

- [11] Royer, A., Barrière, T. and Gelin, J.C. (2016). *“Development and Characterization of a Metal Injection Molding Bio Sourced Inconel 718 Feedstock Based on Polyhydroxyalkanoates”* Metals 2016, Vol. 6, p. 89. doi:10.3390/MET6040089.
- [12] Hiperbaric. (s.f). *“Metal Injection Molding (MIM)”* Accesible en: <https://www.hiperbaric.com/en/hip-technology/hip-techniques/metal-injection-molding/>. Accedida el 18/04/2022.
- [13] Agne, A. and Barrière, T. (2017). *“Modelling and numerical simulation of Supercritical CO2 debinding of Inconel 718 components elaborated by Metal Injection Molding”*, Applied Sciences 2017, Vol. 7, p. 1024. doi:10.3390/APP7101024.
- [14] Gonzalez-Gutierrez, J., Beulke, G. and Emri, I. (2012). *“Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts”*, Some Critical Issues for Injection Molding. doi:10.5772/38070.
- [15] German, R.M. (2012). *“Metal powder injection molding (MIM): key trends and markets”*, Handbook of Metal Injection Molding, pp. 1–25. doi:10.1533/9780857096234.1.
- [16] Lieberwirth, C., Sarhan, M. and Seitz, H. (2018). *“Mechanical Properties of Stainless-Steel Structures Fabricated by Composite Extrusion Modelling”*, Metals 2018, Vol. 8, p. 84. doi:10.3390/MET8020084.
- [17] Indo-MIM. (s.f). *“Metal Injection Molding (MIM) Process”*. Accesible en: <https://www.indo-mim.com/metal-injection-molding-process/>. Accedida el 18/04/2022.
- [18] Özgün, Ö. et al. (2013). *“Microstructural and mechanical characterization of injection molded 718 superalloy powder”*, Journal of Alloys and Compounds, vol. 576, pp. 140–153. doi:10.1016/J.JALLCOM.2013.04.042.
- [19] Banerjee, S. et al. (2019) *“Debinding and sintering of metal injection molding (MIM) components”*, Handbook of Metal Injection Molding, pp. 129–171. doi:10.1016/B978-0-08-102152-1.00009-X.
- [20] Grande, M. (2020) *“Fabricación y caracterización de componentes de inconel 718 producidos mediante manufactura aditiva basada en la extrusión usando pellets de moldeo por inyección metálica”*. UPCommons.

- [21] 3DEO. (Octubre 2020). *"The Economics of Metal Injection Molding versus Metal 3D Printing"*. Accesible en: <https://additivemanufacturing.com/2020/10/01/3deo-the-economics-of-metal-injection-molding-versus-metal-3d-printing/>. Accedida el 18/04/2022.
- [22] Jiménez, M. et al. (2013). *"La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad"*. Interempresas. Accesible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/11634-2-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>. Accedida el 18/04/2022.
- [23] Nazir, A. et al. (2019) *"A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures"*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019, vol. 104, pp. 3489–3510. doi:10.1007/S00170-019-04085-3.
- [24] Hegab, H.A. (2016) *"Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys: a review"*, Manufacturing Review, vol. 3, p. 11. doi:10.1051/MFREVIEW/2016010.
- [25] Martín, G. (2018). *"Introducción a la fabricación aditiva (Cómo y Porqué de la Impresión 3D)"*. Publicación independiente. ISBN: 1717705065.
- [26] Homa, J. and SchwentenweinMartin. (2015). *"Additive Manufacturing of Ceramics: Solutions and opportunities for the CIM industry"*, Powder Injection Molding International, vol. 9, pp. 57–64.
- [27] Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). *"Introduction and Basic Principles"*, Additive Manufacturing Technologies, pp. 1–18. doi:10.1007/978-1-4939-2113-3_1.
- [28] Wiberg, A. (2019) *"Towards Design Automation for Additive Manufacturing: A Multidisciplinary Optimization approach"*. doi:10.3384/LIC.DIVA-160888.
- [29] ASTM International. (2020). *"Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2"*. Accesible en: <https://www.astm.org/f2915-20.html>.
- [30] All3DP. (28 octubre 2021). *"STL File Format: Everything You Need to Know"*. Accesible en: <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>. Accedida el 18/04/2022.
- [31] Luis Llamas. (setiembre 2018). *"Guía básica de introducción a la impresión 3D"*. Accesible en: <https://www.luisllamas.es/guia-basica-impresion-3d/>. Accedida el 18/04/2022.
- [32] Ligon, S.C. et al. (2017) *"Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing"*. Chemical Reviews, vol 117. pp. 10212–10290. doi:10.1021/acs.chemrev.7b00074.

- [33] Moghadasi, M. et al. (2020). *"Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of particle size on feedstock powder and final part properties"*, Ceramics International, vol. 46, pp 16966-16972. doi:10.1016/J.CERAMINT.2020.03.280.
- [34] Milewski, J.O. (2017). *"Additive Manufacturing of metals: from fundamental technology to Rocket nozzles, Medical implants, and custom jewelry"*. Springer Series in Materials Science, vol. 258, pp. 131-150. Springer, USA. ISBN-10: 3319863487
- [35] 3DCEO. (2018). *"Intro to Metal 3D Printing Processes – Powder Bed Fusion (DMLS, SLS, SLM, LMF, DMP, EBM)"*. Accesible en: <https://www.3deo.co/manufacturing/intro-to-metal-3d-printing-processes-powder-bed-fusion-dmls-sls-slm-lmf-dmp-ebm/>. Accedida el 18/04/2022.
- [36] Thomas, D.S. (2018). *"Economics of Additive Manufacturing"*, Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts, pp. 285–320. doi:10.1201/9781315151441-9.
- [37] Vaezi, M., Drescher, P. and Seitz, H. (2020). *"Beamless Metal Additive Manufacturing"*, Materials 2020, Vol. 13, p. 922. doi:10.3390/MA13040922.
- [38] Gonzalez-Gutierrez, J. et al. (2019). *"Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing"*, Materials Letters, vol. 248, pp. 165–168. doi:10.1016/J.MATLET.2019.04.024.
- [39] Crump, S. S. 1992. *"Apparatus and method for creating three-dimensional objects."* Patente US5121329A. USA.
- [40] Valkenaers, H. et al. (2013) *"A Novel Approach to Additive Manufacturing: Screw Extrusion 3D-Printing"*, 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture, pp. 235–238. doi:10.3850/978-981-07-7247-5-359.
- [41] Cherdo. L. (2022). *"Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide"*. Aniwa. Accesible en: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>. Accedida el 18/04/2022.
- [42] Clemens Lieberwirth, Arne Harder and Hermann Seitz (2017). *"Extrusion Based Additive Manufacturing of Metal Parts"*, Journal of Mechanics Engineering and Automation, vol. 7. doi:10.17265/2159-5275/2017.02.004.

- [43] Li, J. *et al.* (2010) *“Study of Metal Powder Extrusion and Accumulating Rapid Prototyping”*, Key Engineering Materials, vol. 443, pp. 81–86. doi:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.443.81.
- [44] Duty, C.E. *et al.* (2017) *“Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials”*, Rapid Prototyping Journal, vol. 23, pp. 181–189. doi:10.1108/RPJ-12-2015-0183/FULL/XML.
- [45] Kishore, V. *et al.* (2017) *“Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components”*, Additive Manufacturing, vol. 14, pp. 7–12. doi:10.1016/J.ADDMA.2016.11.008.
- [46] ATLAS datasheet. Accessible en: <https://titan3drobotics.com/atlas/>. Accedida el 24/04/2022.
- [47] Pollen AM datasheet. Accesible en: https://www.pollen.am/new_pam_series_p/. Accedida el 24/04/2022.
- [48] AIM 3D datasheet. Accesible en: <https://www.aim3d.de/en/products/exam-255/>. Accedida el 24/04/2022.
- [49] Página web del fabricante Mahor·XYZ. Accesible en: <https://mahor.xyz/>. Accedida el 24/04/2022.
- [50] Página web del fabricante Direct3D. Accesible en: <https://www.direct3d.it/>. Accedida el 24/04/2022.
- [51] AMPOWER. (2022). *“Additive Manufacturing Market report”*. Accesible en: <https://additive-manufacturing-report.com/>. Accedida el 24/04/2022.
- [52] SmarTech Analysis. (2019). *“Additive Manufacturing Applications Market Analysis: Metal Additive Manufactured Parts Produced”*. Accesible en: <https://www.smartechanalysis.com/data-reports/>. Accedida el 24/04/2022.
- [53] Lakhdar, Y. *et al.* (2021). *“Additive manufacturing of advanced ceramic materials”*, Progress in Materials Science, vol. 116, Artículo 100736. doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100736.
- [54] Ibrahim, Rosdi *et al.* (2012). *“Injection Molding of Inconel718 Parts for Aerospace Application Using Novel Binder System Based On Palm Oil Derivatives.”* World Academy of

Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, vol. 6, pp. 2112-2116.

[55] German, R.M et al. (1997). *"Injection Molding of Metals and Ceramics"*. Metal Powder Industry, Princeton, NJ. ISBN: 9781878954619.

[56] Wen, G. et al. (2012). *"Development and Design of Binder Systems for Titanium Metal Injection Molding: An Overview"*, Metallurgical and Materials Transactions, vol. 44, pp. 1530–1547. doi:10.1007/S11661-012-1485-X.

[57] Li, Y. min et al. (2007). *"Effects of surfactant on properties of MIM feedstock"*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 17, pp. 1–8. doi:10.1016/S1003-6326(07)60039-9.

[58] Hidalgo, Javier. (2014). *"Development of binder systems based on CAB for powder injection moulding (PIM) and micro powder injection moulding (μ -PIM) of Zircon and Invar powders"*. PhD Thesis. Universidad de Castilla la Mancha.

[59] Hausnerova, B. et al. (2011). *"The Role of Powder Particle Size Distribution in the Processability of Powder Injection Molding Compounds"*, International Journal of Polymer Analysis and Characterization, vol.16, pp. 141–151. doi:10.1080/1023666X.2011.547047.

[60] Uhm, Y.R. et al. (2013). *"Effect of particle size, dispersion, and particle–matrix adhesion on W reinforced polymer composites"*, Research on Chemical Intermediates 2013, vol. 40, pp. 2145–2153. doi:10.1007/S11164-013-1110-7.

[61] Amin, A.M. et al. (2017). *"Green density optimization of stainless steel powder via metal injection molding by Taguchi method"*, MATEC Web of Conferences, vol. 135, p. 38. doi:10.1051/MATECONF/201713500038.

[62] Kong, X., Barriere, T. and Gelin, J.C. (2012). *"Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless-steel feedstocks for micro-powder injection molding"*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 212, pp. 2173–2182. doi:10.1016/J.JMATPROTEC.2012.05.023.

[63] Hamidi, M.F.F.A. et al. (2017). *"Study of solvent debinding parameters for metal injection moulded 316L stainless steel"*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 257, p. 12035. doi:10.1088/1757-899X/257/1/012035.

- [64] Dimitri, C. *et al.* (2017). “*Influence of particle-size distribution and temperature on the rheological properties of highly concentrated Inconel feedstock alloy 718*”, Powder Technology, vol. 322, pp. 273–289. doi:10.1016/J.POWTEC.2017.08.049.
- [65] Hales, A. (2015). “*Metal Injection Moulding of Inconel 718 using a Water Soluble Binder System*”. PhD Thesis. Sheffield University.
- [66] Yang, W.W. *et al.* (2003). “*Solvent debinding mechanism for alumina injection molded compacts with water-soluble binders*”, Ceramics International, vol. 29, pp. 745–756. doi:10.1016/S0272-8842(02)00226-2.
- [67] Banerjee, S. and Joens, C.J. (2012). “*Debinding and sintering of metal injection molding (MIM) components*”, Handbook of Metal Injection Molding, pp. 133–180. doi:10.1533/9780857096234.1.133.
- [68] Gonzalez-Gutierrez, J. *et al.* (2017). “*Shaping, Debinding and Sintering of Steel Components via Fused Filament Fabrication*”, 16th international scientific conference on production engineering, vol. 16, pp. 8–10. doi: 10.1016/j.addma.2019.100861.
- [69] Enneti, R.K. *et al.* (2012). “*Review: Thermal Debinding Process in Particulate Materials Processing*”, Materials and manufacturing process, vol. 27, pp. 103–118. doi:10.1080/10426914.2011.560233.
- [70] Burkhardt, C. *et al.* (2021). “*Deposition Technologies Fused Filament Fabrication (FFF) of 316L Green Parts for the MIM process*”. World pm 2016.
- [71] Kukla, C. *et al.* (2017). “*Fused filament fabrication (FFF) of PIM feedstocks.*”, VI Congreso Nacional de Pulvimetalurgia y I Congreso Iberoamericano de Pulvimetalurgia, vol. 6, pp. 7–9.
- [72] Ecrimesa Group. (2021). “*Análisis comparativo mim vs fdm vs binder jetting*”. Accesible en: <https://ecrimesagroup.com/es/analisis-comparativo-mim-fdm-binder-jetting/>. Accedida el 26/04/2022
- [73] Lous, G.M. *et al.* (1998). “*Fabrication of curved ceramic/polymer composite transducer for ultrasonic imaging applications by Fused Deposition of Ceramics*”, IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp. 239–242. doi:10.1109/ISAF.1998.786678.
- [74] Agarwala, M.K. *et al.* (1996). “*Structural quality of parts processed by fused deposition*”, Rapid Prototyping Journal, vol. 2, pp. 4–19. doi:10.1108/13552549610732034/FULL/XML.

- [75] Kukla, C. et al. (2016). *"Properties for PIM feedstocks used in fused filament fabrication"*, World PM 2016 Congress and Exhibition, pp. 1–6.
- [76] Hunt, R. (2020). *"Tensile testing for 3d printing materials"*. Protolabs. Accesible en: <https://www.protolabs.com/resources/blog/tensile-testing-for-3d-printing-materials/>. Accedido el 10/05/2022.
- [77] Spiller, Q. and Fleischer, J. (2018). *"Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process"*, CIRP Annals, vol. 67, pp. 225–228. doi:10.1016/J.CIRP.2018.04.104.
- [78] Hudson. B. (2021). *"How to design parts for FDM 3D printing"*. Hubs. Accesible en: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/>. Accedida el 29/05/2022.
- [79] Post, B.K. et al. (2016). *"The Economics of Big Area Additive Manufacturing"*, Proceedings of the solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 1176–1182. doi:10.1038/sj.jea.7500356.
- [80] Korotchenko, A.Y. et al. (2020). *"Use of additive technologies for metal injection molding"*, Engineering Solid Mechanics, vol. 8, pp. 143–150. doi:10.5267/j.esm.2019.10.001.
- [81] Furusawa, A. et al. (2017) *"Synthesis of lead-free solder particles using high-speed centrifugal atomization"*, Materials Transactions, vol. 58, pp. 1458–1462. doi:10.2320/MATERTRANS.M2017129.
- [82] Yule, A.J. and Dunkley, J.J. (1994) *"Atomization of Melts: For Powder Production and Spray Deposition (Oxford Series on Advanced Manufacturing)"*. Clarendon Press. ISBN: 0198562586.
- [83] Jenkins. S. (2018). *"Microwave-plasma platform engineers solid-material properties"*. Chemical engineering. Accesible en: <https://www.chemengonline.com/microwave-plasma-platform-engineers-solid-material-properties/>. Accedida el 27/04/2022.
- [84] Cheng Zhu, et al. (2019). *"Colloidal Materials for 3D Printing"*. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, Vol. 10, pp. 17-42.
- [85] Franks, G. V. et al. (2017). *"Colloidal processing: enabling complex shaped ceramics with unique multiscale structures"*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 100, pp. 458–490. doi:10.1111/JACE.14705.

- [86] Patente ES 2 732 766 Al. (2018). "*Procedimiento de obtención de una pieza por modelado por deposición de hilo fundido*".
- [87] Eguiluz, A. et al. (2021). "*Dispersion of Ni nanoparticles into Ti(C,N) colloidal filaments for 3D printing by FFF*", Open Ceramics, vol. 5, p.104. doi:10.1016/J.OCERAM.2021.100064.
- [88] Luk, S.H. (2018). "*Bulk Properties of Powders*", Powder Metallurgy, vol. 7, pp. 111–126. doi:10.31399/asm.hb.v07.a0006109.
- [89] Jenike A. (1964). "*Storage and Flow of Solids*", Bulletin No. 123 of the Utah Engineering Experiment Station, University of Utah.
- [90] Larsson, M. et al. (2013). "*Introduction to a new standardized test method for powder mixes, the Gustavsson flow meter funnel*". International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2013.
- [91] ASTM International. (2006). "*Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell*". Accesible en: <https://www.astm.org/d6128-06.html>.
- [92] Choque. j. (2016). "*Optimización y control de calidad en la construcción de silo de almacenamiento para material puzolánico*". Proyecto final de carrera. Universidad Nacional de San Agustín.
- [93] TerraSource. (2017). "*Recommended Hopper design*". Accesible en: <https://acortar.link/yr2ZL6>. Accedida el 24/04/2022.
- [94] Rane, K., Di Landro, L. and Strano, M. (2019) "*Processability of SS316L powder - binder mixtures for vertical extrusion and deposition on table tests*", Powder Technology, vol. 345, pp. 553–562. doi:10.1016/J.POWTEC.2019.01.010.
- [95] Freitas, D. et al. (2016) "*Sustainability in extrusion-based additive manufacturing technologies*", Progress in Additive Manufacturing, vol. 1, pp. 65–78. doi:10.1007/S40964-016-0007-6/FIGURES/20.
- [96] Turner, B.N., Strong, R. and Gold, S.A. (2014) "*A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling*", Rapid Prototyping Journal, vol. 20, pp. 192–204. doi:10.1108/RPJ-01-2013-0012/FULL/XML.

- [97] Wu, G. et al. (2002) “Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals”, *Materials & Design*, vol. 23, pp. 97–105. doi:10.1016/S0261-3069(01)00079-6.
- [98] Ouradnik, T. (2019). “Manufacturing components and fused of produced deposition modeling (fdm) utilizing metal injection molding (mim) feedstock with a focus on steel alloy 316l”. UPCommons.
- [99] Wang, J., Shaw, L.L. and Cameron, T.B. (2006). “Solid Freeform Fabrication of Permanent Dental Restorations via Slurry Micro-Extrusion”, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, pp. 346–349. doi:10.1111/J.1551-2916.2005.00672.X.
- [100] Spoerk, M. et al. (2017) “Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid)”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134. doi:10.1002/APP.45401.
- [101] Carrier. P. (2018). “3D Printer Print Speed Calculation: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality”. DyzeDesign. Accesible en: <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>. Accedida el 1/05/2022.
- [102] Slic3r. “Flow math”. Accesible en <https://manual.slic3r.org/advanced/flow-math>. Accedido el 1/05/2022.
- [103] Riera, A. (2020). “Estudi de La Tècnica de MEAM Utilitzant Pellets de MIM Aplicada a Productes Comercials”. UPCommons
- [104] Pei, W. et al. (2017) “Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder”, *Applied Physics A*, vol. 123, pp. 1–15. doi:10.1007/S00339-017-1143-7.
- [105] Ren, L. et al. (2017) “Process Parameter Optimization of Extrusion-Based 3D Metal Printing Utilizing PW-LDPE-SA Binder System”, *Materials* 2017, Vol. 10, p. 305. doi:10.3390/MA10030305.
- [106] Iyer, S. et al. (2008) “Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Si₃N₄ Formed by Fused Deposition of Ceramics”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 5, pp. 127–137. doi:10.1111/J.1744-7402.2008.02193.X.

- [107] Wang, K. *et al.* (2019) “*Flexure Behaviors of ABS-Based Composites Containing Carbon and Kevlar Fibers by Material Extrusion 3D Printing*”, *Polymers* 2019, Vol. 11, p. 1878. doi:10.3390/POLYM11111878.
- [108] Spoerk, M. *et al.* (2017) “*Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication*”, *Macromolecular Engineering*, vol. 47, pp. 17–24. doi:10.1080/14658011.2017.1399531.
- [109] Hnatkova, E. *et al.* (2017) “*Processing of MIM feedstocks based on Inconel 718 powder and partially water-soluble binder varying in PEG molecular weight*”, *Powder Technology*, vol. 322, pp. 439–446. doi:10.1016/J.POWTEC.2017.09.029.
- [110] Whyman, S., Arif, K.M. and Potgieter, J. (2018) “*Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets*”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 3417–3428. doi:10.1007/s00170-018-1843-y.
- [111] Stritesky, O. (2020). “*Principios básicos de impresión 3D*”. Prusa Research a.s, Praga.
- [112] Librería digital de instrucciones G-code. Accesible en: <https://reprap.org/wiki/G-code/es>.
Accedida en: 08/05/2022
- [113] Tracey, V.A. (1992). “*Nickel in hardmetals*”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 11, pp. 137–149. doi:10.1016/0263-4368(92)90056-8.
- [114] Miranda, F. *et al.* (2017). “*The influence of the sintering temperature on the grain growth of tungsten carbide in the composite WC-8Ni*”, *Materials Science Forum*, vol. 899, pp. 424–430. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.899.424.
- [115] Prathabrao, M., Amin, S.Y.M. and Ibrahim, M.H.I. (2017). “*Review on Sintering Process of WC-Co Cemented Carbide in Metal Injection Molding Technology*”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 165. doi:10.1088/1757-899X/165/1/012017.
- [116] Ceratizit. (2020). “*¿Qué es el carburo cementado?*”. Accesible en: <https://www.ceratizit.com/int/es/company/passion-for-cemented-carbide-/cemented-carbide.html>. Accedida el 19/05/2022.
- [117] Sarkar, J. (2014). “*Sputtering Target Manufacturing*”, *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*, pp. 197–289. doi:10.1016/B978-0-8155-1593-7.00004-7.

- [118] Garcia-Ayala, E.M. et al. (2021). *"Colloidal processing and sintering of WC-based ceramics with low Ni content as sintering aid"*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 41, pp. 1848–1858. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.038.
- [119] Wikipedia. *"Microscopio Electrónico de Barrido"* Accesible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_electrónico_de_barrido. Accedido el 19/05/2022.
- [120] Chauhan, A. (2018). *"Deformation and damage mechanisms of ODS steels under high-temperature cyclic loading"*, International Journal of Fatigue, vol. 93, pp. 1–17. doi:10.5445/IR/1000080339.
- [121] Guven, O. et al. (2022). *"Effects of grinding time on morphology and collectorless flotation of coal particles"*, Powder Technology, vol. 399. doi:10.1016/J.POWTEC.2021.11.054.
- [122] Ratanatriwong, P. and Barringer, S. (2007). *"Particle size, cohesiveness and charging effects on electrostatic and nonelectrostatic powder coating"*, Journal of Electrostatics, vol. 65, pp. 704–708. doi:10.1016/J.ELSTAT.2007.05.005.
- [123] Kaewprasit, C., Abidi, N. and Gurlot, J.P. (1999). *"Effect of adsorbed water on the specific surface area of some standards cotton"*, Proceedings of the 1999 Beltwide Cotton Conference, vol. 1, pp. 710–711.
- [124] MatWeb. *"PLA 3D870 Biopolymer datasheet"*. Accesible en: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=ec4062c45ad74d5bb10521ad881455c3&ckck=1>. Accedida el 24/04/2022.
- [125] Soloelectronicos. (2017). *"¿Cual es la temperatura ideal del extrusor para imprimir en PLA y ABS?"*. Accesible en: <https://soloelectronicos.com/2017/11/10/cual-es-la-temperatura-ideal-del-extrusor-para-imprimir-en-pla-y-abs/>. Accedida el 31/05/2022.
- [126] Bureau of international Recycling. (2016). *"Report on the Environmental Benefits of Recycling – 2016 edition"*
- [127] Furberg, A., Arvidsson, R. and Molander, S. (2019) *"Environmental life cycle assessment of cemented carbide (WC-Co) production"*, Journal of Cleaner Production, vol. 209, pp. 1126–1138. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.272.

- [128] Rey, I. et al. (2021) *“Environmental Impacts of Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries Based on Life Cycle Assessment”*, ACS Sustainable Chemistry and Engineering, vol. 9, pp. 14488–14501. doi:10.1021/acssuschemeng.1c04938.
- [129] Priarone, P.C. et al. (2017) *“Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions”*, Journal of Industrial Ecology, vol. 21, pp. 191–202. doi:10.1111/jiec.12523.
- [130] Morão, A. and de Bie, F. (2019) *“Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand”*, Journal of Polymers and the Environment, vol. 27, pp. 2523–2539. doi:10.1007/S10924-019-01525-9/TABLES/7.
- [131] ElectricityMap. (2022). *“Emisiones de CO₂ del consumo eléctrico en tiempo real”*. Accesible en: <https://app.electricitymap.org/zone/ES>. Accedido el 22/05/2022.
- [132] Bravi, L., Murmura, F. and Santos, G. (2019) *“Additive manufacturing: Possible problems with indoor air quality”*, Procedia Manufacturing, vol. 41, pp. 952–959. doi:10.1016/j.promfg.2019.10.020.
- [133] Manonukul, A. et al. (2007) *“Study of Recycled and Virgin Compounded Metal Injection Moulded Feedstock for Stainless Steel 630”*, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, vol. 1, pp. 411–420. doi:10.1299/JMMP.1.411.
- [134] Chen, C. et al. (2020) *“Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials”*, Advanced Functional Materials, vol. 30. doi:10.1002/ADFM.202005141.

ANEXOS

A.1 Tablas de referencia de las conexiones de los cabezales y el BLTouch

Tabla A.1. Tabla de referencia para localizar a que componente de los cabezales y el BLTouch corresponde cada conexión. Todos los componentes electrónicos tienen un positivo (+) y un negativo (-). A⁺,A⁻,B⁺,B⁻ corresponden a las conexiones del motor, Heater 1 al calefactor más cercanos a la zona de alimentación y heater 2 al calefactor más cercano a la boquilla, PT al sensor de temperatura, FAN al ventilador general y Blow al ventilador de capa. BL son las diferentes conexiones del BLTouch. HYD y AIR son cables por los que pasa aire y aceite respectivamente.

TABLA DE REFERENCIA						
Componente	Cabezal FDM0	Cabezal FDM1	Cabezal Pasta (No cables)	Cabezal Silicona	Cabezal Pellets	BLTouch
A+	P01	P07		P13	P17	
A-	P02	P08		P14	P18	
B+	P03	P09		P15	P19	
B-	P04	P10		P16	P20	
Heater 1 +	P05	P11			P21	
Heater 1 -	P06	P12			P22	
PT+	S01	S07			S13	
PT-	S02	S08			S14	
FAN+	S03	S09			S15	
FAN-	S04	S10			S16	
Blow+	S05	S11			S17	
Blow-	S06	S12			S18	
HYD0			TØ4 0			
HYD1			TØ4 1			
AIR0			TØ4 2			
BL (5V+)						S21
BL (Zmin)						S22
BL (Control signal)						S23
BL (GND)						S24
Heater 2+					P23	
Heater 2-					P24	
PT2+					S19	
PT2-					S20	

Tabla A.2. Tabla con la referencia a la que corresponde cada una de las conexiones realizadas. Con esta tabla y la tabla de referencias A.1 es posible conocer rápidamente a que componente está conectado cada conexión.

Conexión	Referencia	Conexión	Referencia	Conexión	Referencia	Conexión	Referencia	Conexión	Referencia	Conexión	Referencia
A.1	P01	B.8	S08	D.11	S19	I.2	P02	J.1	S01	J.20	S20
A.2	P02	B.9	S09	D.Tierra	S20	I.3	P03	J.2	S02	K. Negro	P21
A.3	P03	B.10	S10	E.1	P17	I.4	P04	J.3	S03	K. Verde	P22
A.4	P04	B.11	S11	E.2	P18	I.5	P05	J.4	S04	K.Rojo	P23
A.5	P05	B.Tierra	S12	E.3	P19	I.6	P06	J.5	S05	K.Blanco	P24
A.6	P06	C.1	P13	E.Tierra	P20	I.7	P07	J.6	S06	L.Negro	S21
A.7	S01	C.2	P14	F.1	S21	I.8	P08	J.7	S07	L.Verde	S22
A.8	S02	C.3	P15	F.2	S22	I.9	P09	J.8	S08	L.Rojo	S23
A.9	S03	C.Tierra	P16	F.3	S23	I.10	P10	J.9	S09	L.Blanco	S24
A.10	S04	D.1	P21	F.Tierra	S24	I.11	P11	J.10	S10		
A.11	S05	D.2	P22	G.Negro	P17	I.12	P12	J.11	S11		
A.Tierra	S06	D.3	P23	G.Verde	P18	I.13	P13	J.12	S12		
B.1	P07	D.4	P24	G.Rojo	P19	I.14	P14	J.13	S13		
B.2	P08	D.5	S13	G.Blanco	P20	I.15	P15	J.14	S14		
B.3	P09	D.6	S14	H.Negro	S21	I.16	P16	J.15	S15		
B.4	P10	D.7	S15	H.Verde	S22	I.17	P17	J.16	S16		
B.5	P11	D.8	S16	H.Rojo	S23	I.18	P18	J.17	S17		
B.6	P12	D.9	S17	H.Blanco	S24	I.19	P19	J.18	S18		
B.7	S07	D.10	S18	I.1	P01	I.20	P20	J.19	S19		

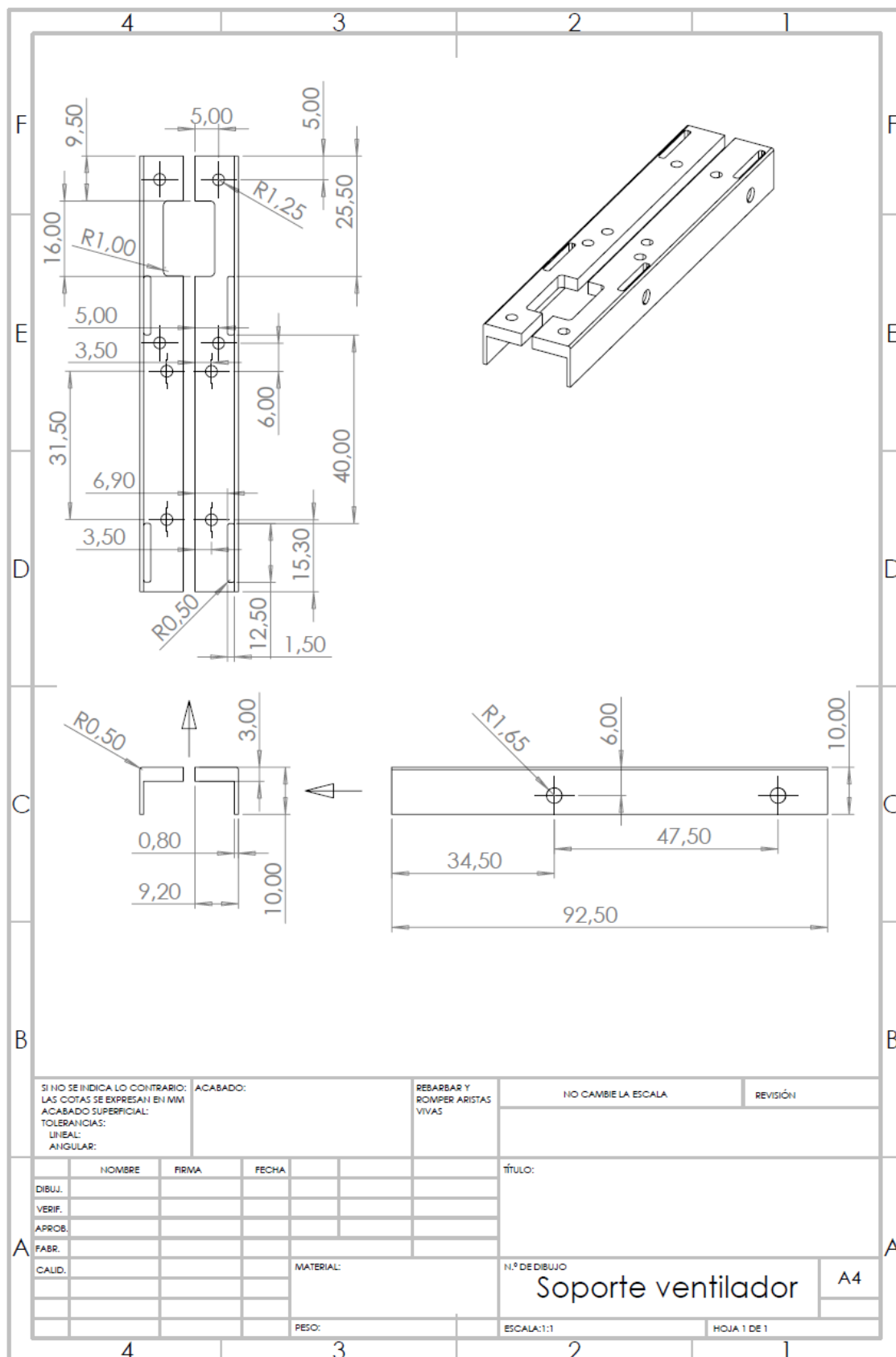


Figura A.2. Planos de los soportes de los ventiladores impresos en 3D.

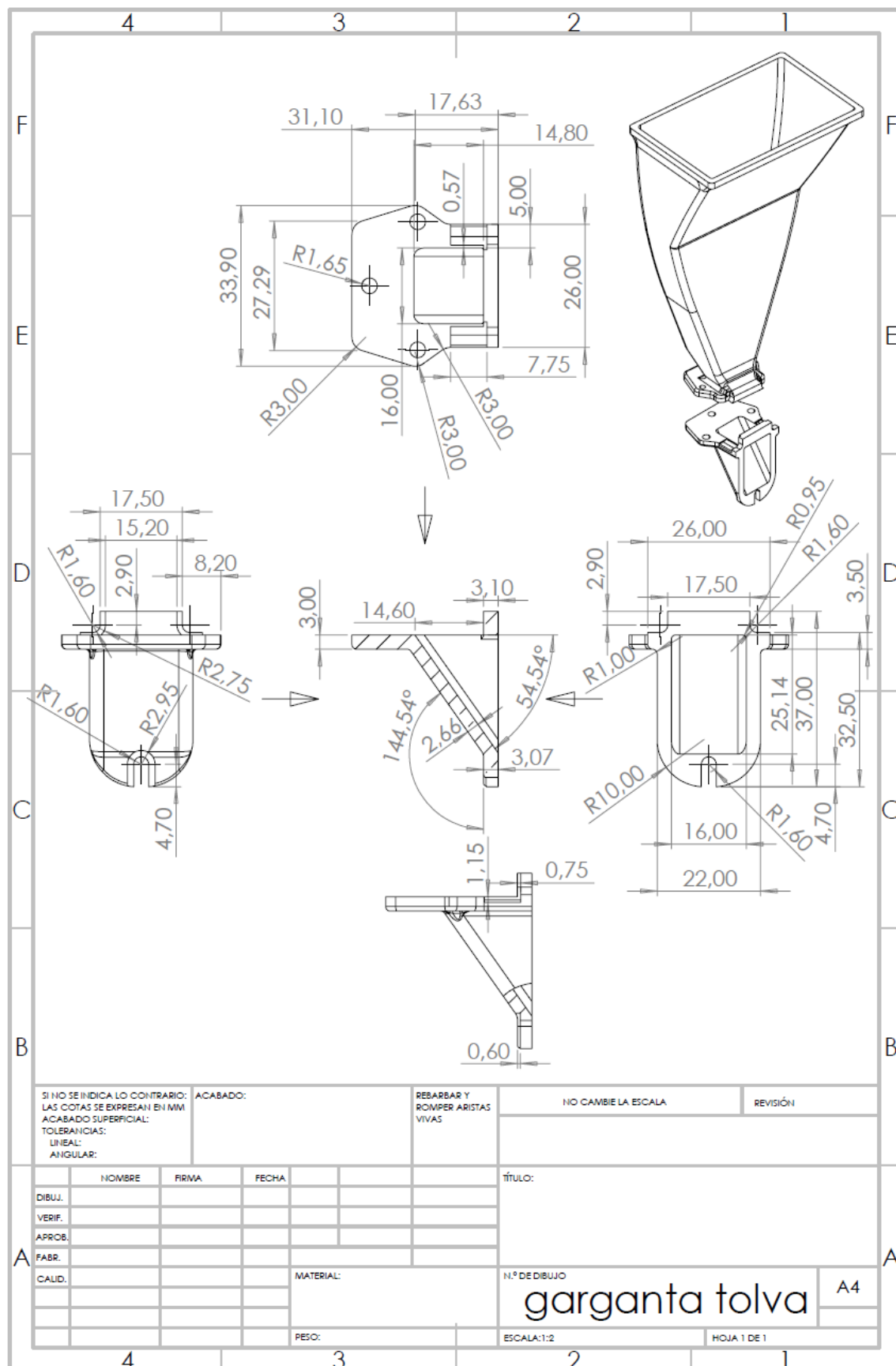


Figura A.3. Plano de la garganta de la tolva impresa en 3D.

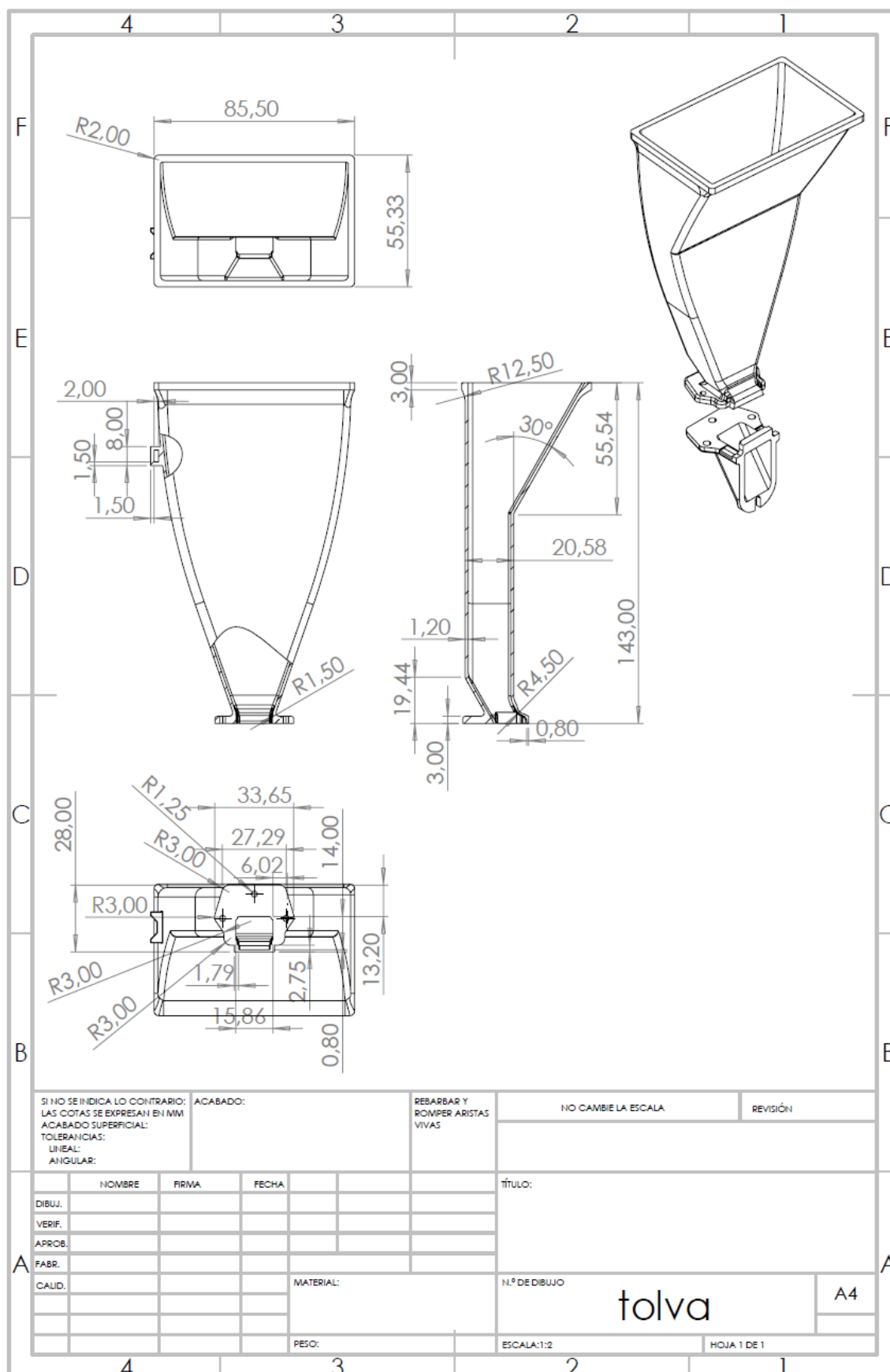


Figura A.4. Plano de la tolva impresa en 3D.

