

La industria 4.0 en tu casa: Impresión de prototipos de herramientas de punzonado para trabajo en caliente con impresoras de modelado por deposición fundida de bajo coste

Industry 4.0 at Your Home: Prototyping Hot Work Punch Tooling with Low Cost Fused Deposition Modeling Printers

Gil Plazas Andrés Fernando, Villamil Galindo Angi Daniela, Rubiano Buitrago Julián David, Viloría Estrada Alexander y Herrera Quintero Liz Karen

Resumen

La manufactura aditiva enmarcada dentro de la industria 4.0 se ha convertido en una tendencia de fabricación en múltiples áreas esto en vista de su gran facilidad y velocidad en la fabricación de prototipos o piezas funcionales. La manufactura aditiva de metales a bajo costo de producción se ha convertido en uno de los grandes retos de los últimos cinco años a nivel industrial y académico, por tanto, el presente trabajo de investigación muestra la ruta de fabricación en la obtención de componentes metálicos mediante manufactura aditiva basada en extrusión desarrollado por el consorcio SENA-UNAL-IMAL para acero de he-

rramientas H13 con fines de aplicación de trabajo en caliente. Este trabajo de investigación muestra la obtención de materiales compuestos polímero-metal en forma de filamento para ser usados en máquinas convencionales FDM, así como la factibilidad técnica en términos de impresión. Obtenido un filamento polímero-metal se generaron prototipos de punzones para perforación en caliente. Impresos los prototipos se muestra y se explica el proceso por el cual se logró la consolidación 100% metálica mediante los procesos de despolimerización y sinterización en fase sólida y fase líquida y como estos dan como resultado cambios a nivel microestructural y mecánico. Lo anterior en la

Fecha de recibido: 11/08/2021. Fecha de aceptación 20/12/2021

Correo electrónico: aisisae@misena.edu.co, advillamil77@misena.edu.co, judrubianobu@unal.edu.co, alexander.viloría@somosgrupo-a.com, lkherreraq@unal.edu.co

Citar como: Gil, A; Villamil, A; Rubiano, J; Viloría, A; Herrera, L (2021). La industria 4.0 en tu casa: Impresión de prototipos de herramientas de punzonado para trabajo en caliente con impresoras de modelado por deposición fundida de bajo coste. *Revista RETO*, 9.

actualidad hace parte de procesos alternos a los existentes que se enmarcan en la industria 4.0 específicamente en el área de impresión 3D metales.

Palabras clave

Manufactura aditiva, Acero H13, Industria 4.0, Sinterización, Microscopía.

Introducción

El fabricar piezas metálicas por manufactura aditiva también conocida como impresión 3D como proceso alternativo a los ya existentes como la fundición, forja, mecanizado, entre otros se ha convertido en una de las principales líneas de investigación de diversas instituciones académicas, así como por la industria con el ánimo de generar nuevas soluciones que permitan acortar los tiempos de producción, así como hacer uso de procesos de tecnologías limpias tipo “Green Technology” (J. Gonzalez-Gutierrez et al. 2018). La producción de componentes metálicos por manufactura aditiva tomó gran impulso mediante el inventor Carl R. Deckard a través de la tecnología SLM (Selective Laser Melting) patentada en el año 1990, la cual hasta la fecha es una de las tecnologías más ampliamente usada en la obtención de piezas metálicas, no obstante, esta tecnología en Colombia en términos de implementación ha quedado rezagada dado el alto costo que supone su adquisición y operación.

En 1989 S. Scott Crump en compañía de su esposa inventó y patentó la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), principalmente desarrollada para materiales poliméricos, la cual en la actualidad es la más ampliamente conocida y usada en la fabricación de prototipos por ser económica, así como de fácil uso. Basado en la economía que supone la adquisición de una máquina FDM frente a una SLM, en el año 1996 M.K. Agarwala junto con otros investigadores desarrollaron filamentos compuestos polímero-cerámico con potencial uso de ser usado en impresoras FDM tomando como base de conocimiento el proceso de moldeo por inyección de metales – PIM (Powder Injection Molding) desarrollado en la década de 1970 por Raymond Wiech en los Estados Unidos de América, por ser un proceso tipo SDS (Shape-Debind-Sintering) conformado, despolimerizado y sinterizado.

En la actualidad la obtención de piezas, componentes, prototipos, etc., mediante impresión 3D con base la técnica FDM, así como algunas variantes en la misma se denominan Manufactura Aditiva Basada en Extrusión (MABE). La fabricación de piezas metálicas por MABE no solo ha cobrado gran uso por su bajo costo, sino también porque microestructuralmente se ha identificado baja o nula anisotropía en comparación con el proceso SLM y sus variaciones denominados procesos de uso de haces, sin embargo, aún son pocos los estudios comparativos entre las técnicas de haces y las de MABE (Vaezi, Drescher, and Seitz 2020).

Basado en lo anterior la presente investigación buscó generar el conocimiento de base que pueda servir a futuro en la obtención de piezas metálicas y poliméricas mediante MABE. Lo anterior fue posible mediante el estudio en los procesos de mezclado y extrusión de material compuesto polímero-metal en la generación de filamentos que técnicamente tuvieran la capacidad de ser impreso por una máquina de escritorio FDM, se identificó que el tipo de polímero usado en la mezcla polímero-metal juega un rol muy importante en sus propiedades mecánicas afectando considerablemente la factibilidad técnica de ser transportada y depositada de manera controlada por un cabezal de impresión. La temperatura a la cual se hace la deposición de la mezcla compuesta se ve afectada por las temperaturas de trabajo dando como respuesta un cambio en las propiedades físicas y geométricas. Lograr la consolidación de un componente impreso en material compuesto polímero-metal a uno totalmente metálico, es una cadena consecutiva de pasos; donde el control de diversos parámetros de procesamiento es crucial en su obtención, parte de estos parámetros fueron estudiados en la presente investigación para lograr fabricar piezas metálicas por manufactura aditiva.

1. Estado de la técnica

La Manufactura Aditiva (MA) o Additive Manufacturing (AM) consistente en manipular material a escala micrométrica y depositarlo de forma muy precisa para construir un sólido, capa por capa. Aunque novedosas, son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio, lo que supone una nueva revolución in-

dustrial – o llamada actualmente industria 4.0. La fabricación aditiva comprende varios métodos de producción, pero todos empiezan de la misma manera, con un archivo de diseño asistido por computadora CAD (Computer Aided Design). Un software analiza el archivo de CAD y lo corta digitalmente en múltiples secciones transversales o capas, que luego una máquina lee el archivo de coordenadas y recrea el objeto en forma estratificada hasta constituir la pieza deseada (J. Gonzalez-Gutierrez et al. 2018).

En general la fabricación aditiva comprende una serie de etapas en las cuales se involucran herramientas de diseño; análisis, selección y control de calidad de materia prima; fuentes de energía y post-procesado. Es indudable que está tecnología es multidisciplinaria ya que involucra desde la concepción de la pieza a partir del diseño, la optimización de material, el conocimiento metalúrgico y químico del proceso hasta etapas de post-procesado y acabado final.(Cano et al. 2019)

Las tecnologías de manufactura aditiva - MA suponen un giro respecto a los procesos de fabricación de piezas empleadas hasta este momento, ya que se pasa a fabricar por deposición controlada de material, capa a capa, aportando exclusivamente allí donde es necesario, hasta conseguir la geometría final que se persigue, en lugar de arrancar material (mecanizado, troquelado) o conformar con ayuda de utillajes y moldes (fundición, inyección, plegado) (DebRoy et al. 2018).

La manufactura aditiva de metales está desarrollada principalmente en los procesos SLM (Selective Laser Melting o en español Sinterización Selectiva por Láser), DMLS (Direct Metal Laser Sintering o en español Sinterización Directa de Metal por Láser) EBM (Electron Beam Melting o en español Fusión por Haz de Electrones), estas tres técnicas de manufactura aditiva están concebidas dentro de las categorías de fusión sobre cama de polvo o PBF (Powder Bed Fusion) en donde se hacen uso de fuentes de fusión por haz láser o haz de electrones para fundir de manera controlada capas de polvo metálico, (Chniouel 2019).

Otras técnicas de manufactura aditiva categorizadas dentro de DED (Deposición Directa de Energía) como LDMD (Laser Direct Metal Deposition o en español Deposición Directa de Metal por Lá-

ser) o EBM depositan polvo de manera controlada mediante una boquilla que a su vez es fundido de manera inmediata generando una geometría tridimensional, (Chniouel 2019; Jelis et al. 2015; Yamanoglu et al. 2013).

En la actualidad con el ánimo de promover la facilidad de manufacturar componentes metálicos a bajo costo se están generando investigaciones en procesos alternos a los de fusión (Godec et al. 2020; Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2017, 2018, 2019). Estos procesos de manufactura se caracterizan por su facilidad de imprimir componentes metálicos, dado que hacen uso de maquinaria de impresión de bajo costo, como lo son las impresoras de filamento polimérico de tecnología FDM (Fused Deposition Modeling).

En FDM, el material de construcción se suministra en forma de filamento a base de polímero siendo el PLA (Ácido Poli-Láctico) y el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) los más usados, estos filamentos son empujados por engranajes o rodillos hacia una unidad de calentamiento que los funde y que son suministrados de forma controlada por una boquilla (extrusión) hacia una base que tiene la capacidad de moverse en el plano X-Y, esto con el fin de generar una geometría específica. El proceso FDM fue concebido inicialmente para materiales poliméricos, sin embargo, en la actualidad se desarrollan filamentos de materiales compuestos, es decir materiales polímero-metal y polímero-cerámico. Los materiales poliméricos se han constituido en material interesante para la impresión 3D de materiales compuestos porque son un vehículo para dispersión y transporte de materiales pulverizados en la fabricación aditiva, pues debido a su alta viscosidad sustentan las partículas y facilitan el moldeo a determinadas temperaturas.

A diferencia de la práctica empleada cuando se busca el refuerzo de los materiales poliméricos con agregados de partículas sólidas, en porcentajes que rara vez superan 20% en peso, en el área de MABE de componentes metálicos o cerámicos se emplean proporciones de partículas metálicas entre un 50% y 60% en volumen, lo que en peso se traduce en aproximadamente 87% a 93%. Este proceso aunque relativamente nuevo en el área de manufactura aditiva es un derivado del proceso PIM (Powder Injection Molding) (Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2017).

Los filamentos compuestos (polímero-metal o polímero-cerámico) al igual que los filamentos poliméricos deben tener una serie de propiedades específicas dentro de las cuales se destacan: a) ser un material flexible, b) ser rígido, c) estar constituido de un material termoplástico, d) poseer una baja viscosidad, e) tener la capacidad de adherirse fácilmente a una superficie (Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2017). Lo anterior son las propiedades más importantes a tener en cuenta cuando se quiere fabricar un filamento compuesto, lo que supuso un reto para este proyecto de investigación.

Los materiales poliméricos juegan un papel muy importante en el procesamiento de componentes de metal mediante MABE, estos deben proporcionar como se mencionó anteriormente diversas propiedades, razón por la cual un solo polímero no es adecuado para la obtención de los materiales compuestos (polímero-metal).

Con base en lo anterior se decidió generar una mezcla multicomponente de polímeros, un polímero flexible y otro rígido, donde uno de los polímeros que ha venido cobrando gran uso en este campo son los TPE. Los Termoplásticos Elastómeros son materiales que poseen propiedades combinadas de los termoplásticos y de los elastómeros, donde al ser termoplástico permite la posibilidad de ser moldeado mediante temperatura puesto que se funde y así poderle dar diversas formas, así

como que tiene propiedades de los elastómeros donde este tipo de materiales se caracterizan por su alta elasticidad.

Los TPE son materias primas que brindan la propiedad de elasticidad, sin embargo, no poseen una rigidez adecuada, es por ello suelen ser mezclados con otra familia de polímeros como son las poliolefinas, materiales de mayor dureza y gran resistencia a los disolventes (Godec et al. 2020; J. Gonzalez-Gutierrez et al. 2018; Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2018; Christian Kukla et al. 2016, 2019; Christian Kukla, Gonzalez-Gutierrez, et al. 2017; Lengauer, Duretek, Fürst, Schwarz, et al. 2019; Thompson et al. 2019). El realizar una mezcla de dos polímeros tiene varias funciones, la primera es permitir generar un material con propiedades combinadas flexibilidad y rigidez; la segunda es generar un material que luego de ser moldeado por impresión o por otro método se obtiene un componente o parte denominada “en verde”, en donde en el componente en verde se le puede remover tan solo uno de los polímeros mezclados de manera química, esto es beneficioso puesto que al tener una mezcla de polímero A y B con material particulado se genera una la disolución selectiva del polímero A en un disolvente para formar una red porosa abierta, como se muestra de manera esquemática en la Figura 1. (Cano et al. 2019; Christian Kukla et al. 2019; Lengauer, Duretek, Fürst, Schwarz, et al. 2019).

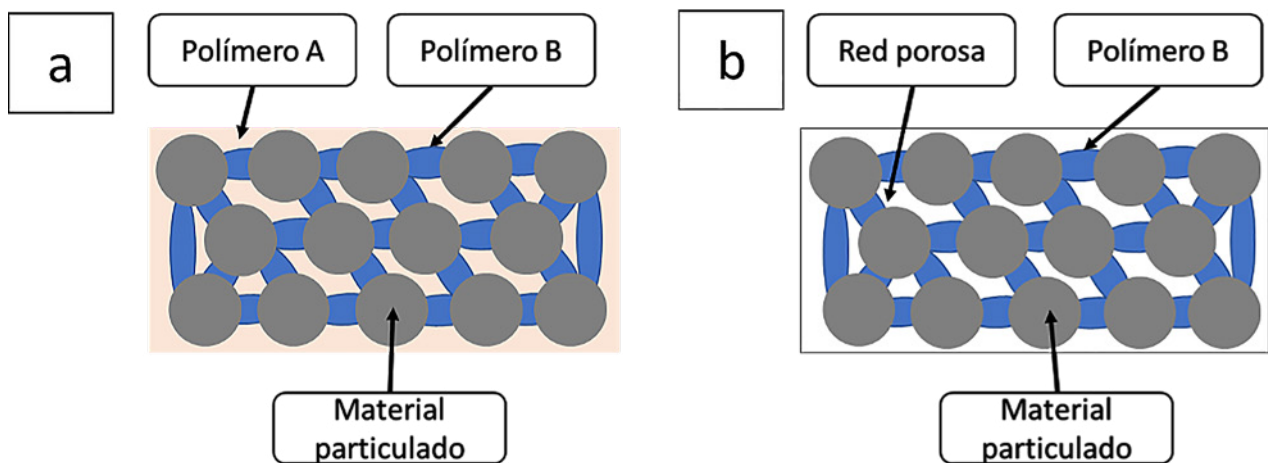


Figura 1. Esquema de interacción de mezcla multi-polimérica

Nota de la figura: a) Mezcla de polímero A y B con presencia de partículas metálicas, b) Polímero A eliminado por acción de un disolvente dejando una red porosa y el polímero B que sustenta las partículas metálicas.

Una vez el polímero A es retirado vía química, el polímero B es capaz de sustentar el material particulado, lo que significa la retención de la geometría. La red porosa creada tiene como objetivo permitir el paso de los gases que se generan producto de la degradación térmica del polímero B dando así paso al proceso de sinterización que será explicado en el capítulo tres (Abel et al. 2019; J. Gonzalez-Gutierrez et al. 2017; Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2019; Christian Kukla, Gonzalez-gutierrez, et al. 2017).

Cuando se hace mezcla de materiales compuestos polímero-metal con dos polímeros, la parte polimérica que se compone del 50% en volumen, es compuesta por un 60% del polímero que flexibiliza (Polímero A) y un 40% del polímero que rigidiza (Polímero B), estos últimos porcentajes dados en peso (C. Kukla et al. 2017; Lengauer, Duretek, Fürst, Gonzalez-Gutierrez, et al. 2019; Thompson et al. 2019).

2. Metodología

2.1. Polvo de partida

Para el presente trabajo se usó un acero de herramientas AISI-SAE H13. Este material es uno de los más ampliamente usados en componentes de herramientas tales como moldes, punzones para trabajo en caliente, entre otros. (Besler et al. 2017).

El polvo de partida de acero H13 fue fabricado por la empresa CHENGDU HUARUI INDUSTRIAL CO., LTD que posee un tamaño de partícula de $-53\mu\text{m} +20\mu\text{m}$ obtenido por atomización con gas nitrógeno. En la Tabla 1 se muestra la composición química del acero H13.

Tabla 1. Composición química de acero H13

C	0,37%
Si	0,96%
Cr	5,28%
Mn	0,39%
Mo	1,29%
V	1,07%
P	0,011%
S	0,004%
Fe	Balance

Se realizó la caracterización morfológica mediante microscopía electrónica de barrido SEM (Scanning Electron Microscopy) en el equipo Phenom XL en donde se generaron capturas a bajos aumentos 500X con el fin de poder identificar con análisis de imágenes la distribución de los polvos. El proceso se realizó mediante binarización de imágenes con el software ImageJ corroborándose la información suministrada por el fabricante.

A un aumento de 5000X se identificaron los detalles morfológicos del polvo. En donde se pudieron identificar partículas llamadas satélites, estas se producen por colisiones o impacto de partículas finas de polvo solidificado o semisolidificado es decir en estado pastoso en las partículas más gruesas fundidas o semifundidas durante varias etapas de solidificación (Chniouel 2019; German, Suri, and Park 2009; Jelis et al. 2015). La presencia de satélites es beneficiosa para procesos de manufactura aditiva, dado que estos ayudan a que las partículas puedan sostenerse con facilidad una con otra cuando están dispersas, esto debido a que generan entre las mismas un efecto cuña. En la Figura 2. se evidencia la formación de satélites en el acero H13, estos se revelan encerrados mediante óvalos de color rojo.

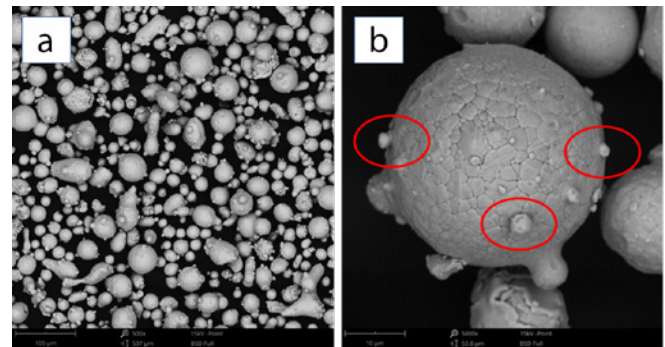


Figura 2

Nota de la figura: Acero H13, a) Imágenes SEM de la morfología del polvo H13, b) Detalle morfológico de un satélite presente en una partícula de polvo.

Que el polvo metálico presente una distribución homogénea de tamaño de partícula es beneficioso para ser usado mediante procesos de manufactura aditiva donde se hace uso de filamentos compuestos de polímero-metal: Kukla et al han demostrado que un cambio en la distribución del tamaño de polvo, es decir la presencia de grandes partículas metálicas sobre pequeñas impide la posibilidad de generar filamentos compuestos, por efecto de un

aumento en la viscosidad en el material, imposibilitando la posibilidad de fluir sobre una boquilla de impresión (Christian Kukla, Gonzalez-Gutierrez, et al. 2017).

2.2. Mezclado

En el mezclado de materiales poliméricos con materiales particulados se utilizan varios diseños de mezcladores de alto cizallamiento para obtener una distribución uniforme del polímero sobre el polvo. Algunos de los equipos usados en el mezclado de materiales compuestos son extrusoras de un solo tornillo, extrusora de doble tornillo, doble leva, doble planetaria, mezclas de cuchillas en Z, etc.

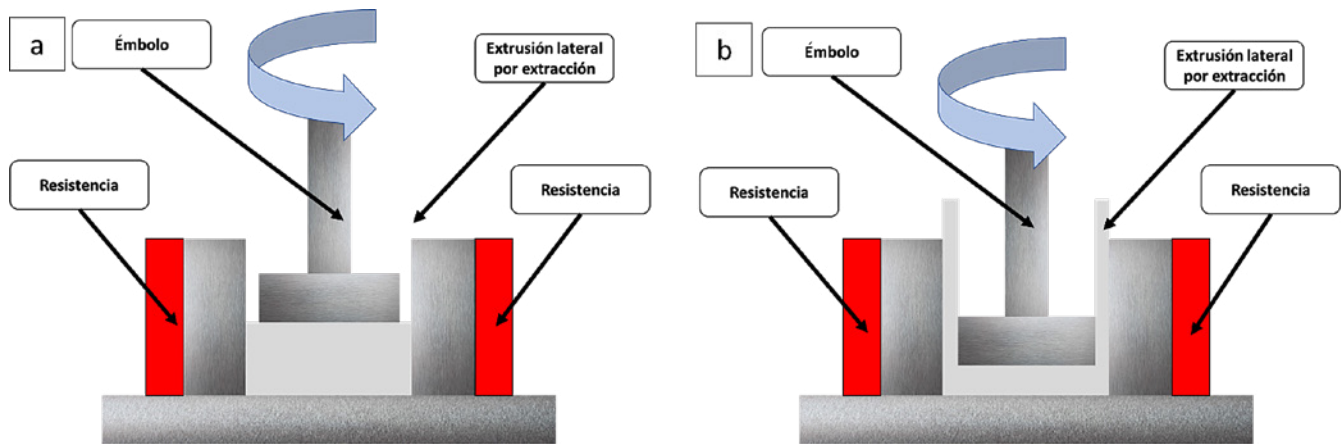


Figura 3. Proceso esquemático de mezclado con el equipo del laboratorio de fundición y pulvimetalurgia

Nota de la figura: a) Mezclado inicial de la mezcla, b) Extracción de material y mezclado por corte de extrusión.

3.3. Extrusión e impresión

Una vez el material es mezclado y solidificado, este es pelletizado. Obtenidos los pellets, estos fueron llevados al equipo de extrusión de marca Filastruder con dado de extrusión de diámetro $1,75 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

El equipo de impresión utilizado por el método FDM (Creality Ender 3 Pro) cuenta con una boquilla de 0.8mm de acero inoxidable y resolución de impresión entre 0.1 - 0.4mm en espesor de capa, alcanza velocidades de 22 hasta 180mm/s y el volumen de impresión es de 220 x 220x 250 mm. Las temperaturas máximas en boquilla y en la base son de 240 °C y 100°C respectivamente.

El filamento debe tener la capacidad de ser enrollado y desenrollado, el cual es transportado por

A fin de generar un material compuesto homogéneo el polvo metálico se mezcló con los polímeros en un mezclador de base cilíndrica calentada lateralmente mediante una resistencia eléctrica, donde se alberga el material polimérico y el material particulado que es mezclado por acción de cizallamiento de un émbolo superior que se encuentra conectado a un husillo de un taladro de árbol, Figura 3. Una vez el material es mezclado por cizalladura, un segundo cizallamiento del material es realizado al extraer el material por el espacio existente entre la base y el émbolo.

un rodillo y un engranaje a una zona de fusión donde constantemente es empujado y llevado a una boquilla de impresión que, de manera, controlada logra crear una geometría mediante un control NC (Numerical Control).

Un filamento usado en el proceso de impresión 3D, tiene dos propiedades básicas: flexibilidad para ser enrollado y rigidez para ser empujado hacia la zona de fusión sin presentar pandeo. La rigidez es importante porque el mismo filamento actúa como un émbolo lo que posibilita un empuje del material fundido por extrusión hacia la boquilla de impresión, Figura 4 (Christian Kukla, Gonzalez-gutierrez, et al. 2017).

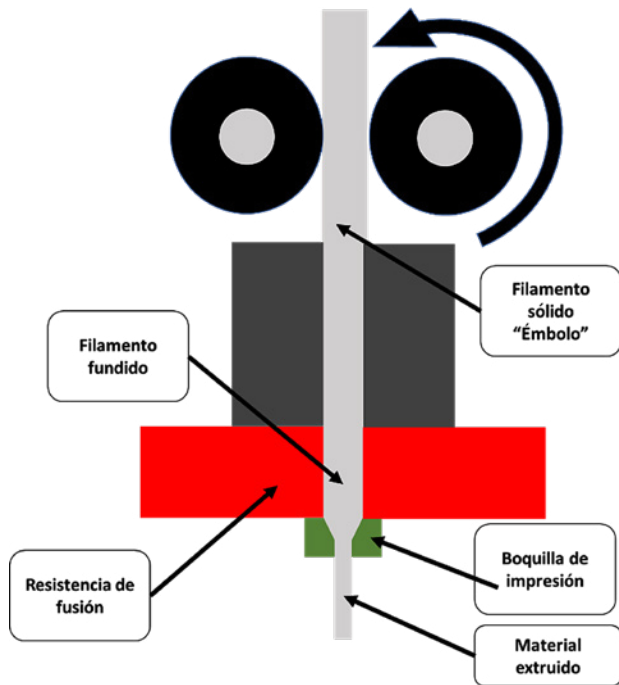


Figura 4. Esquema de un filamento actuando como émbolo.

Fuente: Autor

La obtención de materiales compuestos para procesos de impresión 3D al igual que se usa en los procesos de PIM, es una mezcla polímero-metal, donde el polímero se encuentra entre un 45% – 50% en volumen y el restante entre 55% y 50% en volumen de metal (Godec et al. 2020; Gonzalez-gutierrez et al. 2016; J. Gonzalez-Gutierrez et al. 2017; Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2018, 2019, 2014, 2017; Gonzlez-Gutierrez, Beulke, and Emri 2012; Christian Kukla et al. 2018; Christian Kukla, Gonzalez-gutierrez, et al. 2017; Lengauer, Duretek, Fürst, Gonzalez-Gutierrez, et al. 2019).

3.4. Despolimerizado y sinterización

Las temperaturas de degradación térmica de los polímeros se estudiaron mediante análisis termogravimétrico (TGA) en atmósfera de N₂ con una rampa de calentamiento de 10 °C / min, de 25 °C a 1000 °C (Mettler Toledo, TGA 1, STARe System). La extracción de los polímeros en las muestras impresas se realizó en dos pasos. En primer lugar, se realizó la despolimerización por disolvente utilizando ciclohexano calentado a 60°C y mezclando a 300 rpm durante 24 horas para la remoción del TPE. En segundo lugar, se realizó el despolimerizado térmico considerando la respuesta del PP a

la prueba TGA. las muestras se sinterizaron en un horno de vacío PVT 1700 en atmosfera de hidrogeno y nitrógeno a 1300°C y a 1400°C. Unas muestras se sinterizaron en una condición SS (Solid State) a 1300 °C y las otras muestras se sinterizaron a 1400 °C para formar fase liquida mediante el mecanismo SLPS (Super-Solidus Liquid Phase Sintering) y de esta manera promover una mejor densificación.

3. Resultados y discusión

4.1 Impresión

La adhesión de la primera capa impresa en la cama de impresión es fundamental, ya que sin una adhesión adecuada no se puede construir la pieza final. La adhesión inadecuada da como resultado objetos impresos de mala calidad, debido a desplazamientos, deformaciones o delaminaciones del objeto durante el proceso de impresión (Spoerk et al. 2018). Por tanto, la adherencia entre el material compuesto extruido y la cama de impresión debe ser lo suficientemente alta para mantener el objeto impreso en su lugar durante la impresión (Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2019). Sin embargo, la adherencia tras finalizar el proceso de impresión debe ser baja a fin de poder retirar fácilmente el componente impreso, para de esta manera no dañar el impreso (Rane, Castelli, and Strano 2019; Singh et al. 2020).

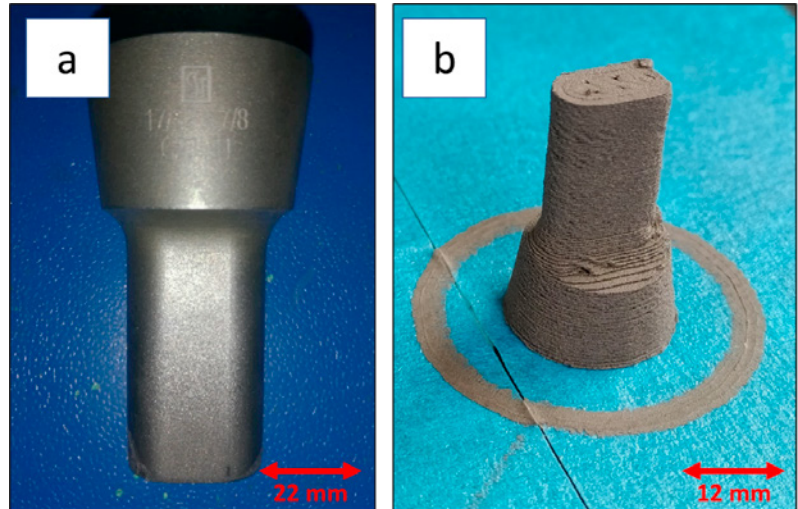
A medida que se enfría el polímero fundido, el volumen del polímero, tanto el volumen libre entre las cadenas macromoleculares como su volumen vibratorio, disminuye, esto da como resultado la contracción del material haciendo que exista un desprendimiento del impreso, (Spoerk, Holzer, and Gonzalez-Gutierrez 2020). Por lo que aumentar la temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea del material (T_g) del filamento conduce a una reducción de la tensión superficial entre la cama de impresión y el material de impresión generando un área de contacto más grande que finalmente causa una mejor adhesión entre la cama y el filamento.(Spoerk et al. 2018).

En función de lo anterior el material compuesto obtenido fue impreso a una temperatura de boquilla de 230°C y a una temperatura de cama de impresión de 100°C, en donde la geometría selec-

cionada fue un prototipo de un punzón de perforación de trabajo en caliente usado en la fabricación de amortiguadores de resorte de ballesta usados en la empresa IMAL S.A. La geometría obtenida una vez impresa se muestra en la Figura 5. Las temperaturas de impresión seleccionadas se obtuvieron con base en los diagramas TGA y DSC del material polimérico mezclado, es decir PP-TPE.

Figura 5. Punzones en acero H13. a) Punzón mecanizado en acero H13. b) Prototipo impreso mediante MABE en acero H13.

Fuente: Autor.



4.2. Despolimerizado

Para poder llevar a cabo la sinterización de acero es necesario eliminar la carga polimérica presente en las piezas obtenidas por manufactura aditiva, al igual que se usa en el proceso PIM. En primer lugar, la pieza es sumergida en un solvente con el fin de retirar el elastómero termoplástico que impartió flexibilidad y por lo tanto permitió que el filamento fuera fácilmente enrollado, esta disolución selectiva genera una red porosa. El polímero remanente (polipropileno) se suele denominar “Backbone” que en castellano sería columna vertebral, está sustenta los polvos y se descompone térmicamente en un horno con atmósfera controlada, en donde gracias a la red porosa generada por la extracción del primer polímero, se facilita la posterior salida de los gases del proceso mediante pirólisis (Banerjee and Joens 2012).

Para el caso de las probetas impresas con el material compuesto (TPE-PP-H13), el polímero TPE fue disuelto con ciclohexano con base en la referencias (Abel et al. 2019; Joamin Gonzalez-Gutierrez et al. 2019; Lengauer, Duretek, Fürst, Schwarz, et al. 2019; Thompson et al. 2019) donde de igual manera hicieron uso de TPE en los filamentos. El control de pérdida de masa del polímero TPE se realizó cada 6 horas, donde se pudo observar que el TPE fue disuelto en su totalidad a 24 horas.

Antes de la sinterización, el aglutinante orgánico “Backbone” debe eliminarse sin generar pérdida de contacto entre las partículas de pol-

vo moldeadas por impresión 3D; este proceso se conoce comúnmente como despolimerizado, que para este caso se realizó mediante despolimerizado térmico. Los polímeros orgánicos deben eliminarse completamente de la “parte verde”, ya que los residuos de carbono pueden influir en el proceso de sinterización y afectar negativamente a la calidad del producto final (Myers and Heaney 2012). El despolimerizado térmico es uno de los pasos más críticos en el proceso de obtención de componentes por manufactura aditiva basada en extrusión, ya que se pueden producir defectos como sopladuras, agrietamiento y ampollamiento. (Gonzalez-Gutierrez, Beulke, and Emri 2012).

Con base en los diagramas obtenidos por TGA se realizó el despolimerizado térmico, en donde el material es calentado lentamente a 0,5°C/min hasta 200°C con un sostenimiento de 60 min, luego es calentado hasta 350°C con una rampa de 0,5°C/min y un sostenimiento de 120 min, para finalizar el proceso el material es calentado hasta 500°C con una rampa de 0,3°C/min y un sostenimiento de 30 min, el tiempo total del proceso de despolimerizado térmico fue de 23 horas.

La práctica de despolimerizado térmico se realizó de manera lenta para prevenir la aparición de defectos, así como la generación de productos carbonosos que pueden generar alteración de las propiedades físicas y microestructurales en el metal una vez sinterizado. Todo el proceso se rea-

lizó en vacío a fin de generar mayor velocidad de extracción del polímero (Enneti et al. 2012), (González-Gutierrez, Beulke, and Emri 2012)

4.3. Sinterización

La sinterización de aceros principalmente se da mediante un tratamiento térmico donde las dos variables de estudio más importantes son el tiempo y la temperatura, siendo la temperatura aquella que logra mayor densificación del material, en función que esta propende la formación una fase líquida que moja las partículas metálicas favoreciendo el proceso de crecimiento de grano y densificación (German, Suri, and Park 2009). La sinterización de aceros se da un proceso de formación parcial de fase líquida que no supera más del 15% en porcentaje en peso, a lo que se le denomina proceso SLPS (Supersolidus Liquid Phase Sintering), esto con el objeto de densificar al máximo y lograr propiedades mecánicas óptimas (German 1986). No obstante, el tiempo de sinterización también es una variable para considerar cuando se sinterizan aceros bien sean de maquinaria o de herramientas, dado que a mayor tiempo de sinterización logra mayor densificación generando propiedades mecánicas altas, si bien sinterizar mediante SLPS es una opción, el sinterizar a bajas temperaturas sin formación de líquido y largos tiempo de proceso puede lograr componentes funcionales para algunas aplicaciones. El sinterizar durante largos tiempos mediante SLPS favorece la distorsión geométrica de las piezas, prototipos, etc., siendo la sinterización en fase sólida una ruta alterna para mantener una tolerancia geométrica puntual (German 1999).

Sin embargo, dependiendo de las propiedades mecánicas deseadas, así como el porcentaje de porosidad deseado se puede sinterizar en estado sólido en donde las partículas metálicas en un estado inicial se encuentran en contacto, a medida que aumenta la temperatura se da la formación de cuellos por efecto del transporte de masa generado por difusión de volumen (VD) que involucra el transporte de átomos de fuentes superficiales por evaporación y condensación (E-C) y difusión de superficie (SD). Si el tiempo de sinterización avanza se da un crecimiento de cuello haciendo que las partículas se acerquen entre sí, promoviendo

la densificación y contracción. Lo anterior se produce gracias al flujo plástico o viscoso (PF) en el que se encuentra el material en donde la difusión se acelera por difusión de límite de grano (GB). Si el proceso continúa durante un tiempo infinito, las partículas deberían terminar como una esfera, en un estado de menor energía (Banerjee and Joens 2012).

Para obtener aceros con un porcentaje de carbono puntual es necesario que la atmósfera de sinterización o el material contenga carbono extra, para que de esta manera el contenido extra de carbono pueda reducir el oxígeno del polvo metálico (Banerjee and Joens 2012). Por lo anterior las piezas impresas y despolimerizadas por solvente químico y térmicamente se colocaron en un recipiente secundario en carbono (grafito) y para evitar que el acero tuviera contacto directo con el mismo se colocó una pequeña capa de alúmina en la base para de esta manera actuará como barrera impidiendo la difusión de carbono al polvo metálico y su contaminación. Aunque los aceros pueden ser sinterizados en atmósferas inertes como nitrógeno o argón, en este caso se seleccionó atmósfera de hidrógeno con el fin de reducir los óxidos presentes en el polvo, si bien sinterizar con atmósfera de hidrógeno ocasiona mayor pérdida de carbono en el acero por efecto de la formación de metano (Banerjee and Joens 2012), el carbono naciente para dar lugar a la formación de este metano proviene de las cajas de grafito que protegen el material impreso, permitiendo a su vez que el acero no se descarburice y de paso a la formación de fase ferrítica.

Con el fin de identificar los cambios microestructurales de los prototipos impresos y sinterizados a diversas temperaturas, dos temperaturas de sinterización fueron trabajadas siendo 1300°C y 1400°C, en donde a 1300°C únicamente fase sólida austenítica en donde el mecanismo por el cual se genera densificación en el material es sinterización en estado sólido a diferencia de cuando se sinteriza con presencia de líquido las difusividades son bajas en comparación con las difusividades líquidas (German, Suri, and Park 2009), en este proceso existe la necesidad de suprimir las superficies libres y de esta manera reducir la energía superficial, propendiendo la formación de enlaces sólidos entre partículas. Conforme se

suprimen las superficies libres, se da paso a la migración de los poros y esto genera densificación y por ende ganancia en las propiedades mecánicas (Banerjee and Joens 2012). A 1400°C En este proceso las partículas metálicas por efecto del aumento de la temperatura forman parcialmente una fase líquida, esta favorece la densificación en el material por efecto de la acomodación de la partícula, esto a su vez genera un crecimiento de partícula y por ende de grano mediante la re-precipitación en la solución. La acomodación de la forma del grano es favorable porque la energía interfacial total se reduce, este fenómeno se ve acelerado porque la reducción de energía de la interfaz Sólido-Líquido (S-L) es mayor en comparación entre las partículas, esta tensión capilar genera un movimiento de centro a centro entre partículas que hace que el material reduzca considerablemente su porosidad (German, Suri, and Park 2009). La selección de los valores de temperatura fueron seleccionados con base en el diagrama de fase del acero H13 (Besler et al. 2017).

4.4. Evaluación microestructural

Finalizado el proceso de sinterización de los prototipos por temperatura, se procedió a ejecutar ensayos de densidad en la balanza Sartorius con kit densidad mediante el método de Arquímedes, encontrándose una densidad promedio de 6,603 g/cm³ ±0,051 para el conjunto de probetas que fueron sinterizadas en fase sólida a 1300°C, alcanzando un 85,19% de la densidad del acero H13. Para el conjunto de probetas que fueron sinterizadas bajo el mecanismo SLPS a 1400°C,

se obtuvo una densidad promedio de 7,393 g/cm³ ±0,022 lográndose un 95,38% de la densidad del acero H13.

Las probetas sinterizadas a 1300°C muestran una porosidad interconectada producto de los cuellos de sinterización generados en estado sólido, estos cuellos son la unión entre las partículas esféricas del material. En la Figura 6a se muestra la sección transversal de una de las probetas sinterizadas en estado sólido, en donde se puede observar que existe una porosidad agrupada de manera lineal y grupal en el plano XY, esta porosidad muestra un patrón continuo y ordenado la cual sigue el patrón de impresión llevado a cabo en la estrategia de impresión realizada. Si bien esta porosidad podría ser disminuida mediante la interposición de líneas de impresión (Qaud 2018), así como poder maximizar la rigidez y resistencia del material, es necesario plantear una base de conocimiento que busque generar mayor compresión en trabajos futuros.

A la temperatura de sinterización de 1400°C Figura 6c el material presenta menor porosidad en comparación con la que fue sinterizada a 1300°C, observándose porosidad aislada producto de falta de coalescencia entre partículas por efecto del ángulo diedro que se forma entre tres partículas esféricas. El porcentaje de porosidad medido mediante tratamiento de imágenes en los materiales sinterizados fue de 19,46%±0,41 para la sinterizada a 1300°C y de 1,01%±0,03 a 1400°C.

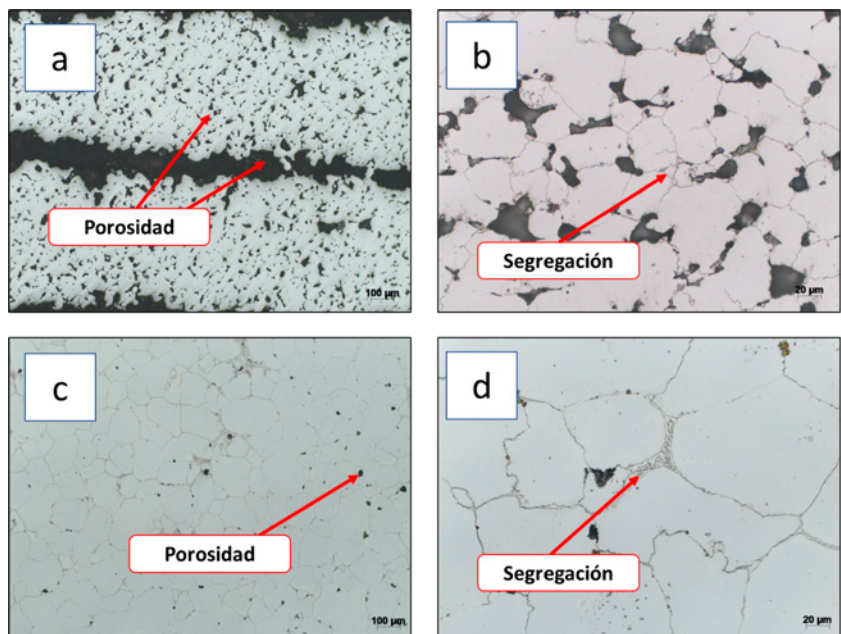


Figura 6. Microestructura obtenida tras sinterización del acero H13. a) Acero H13 sinterizado a 1300°C, b) Detalle microestructural de acero H13 sinterizado a 1300°C, c) Acero H13 sinterizado a 1400°C, b) Detalle microestructural de acero H13 sinterizado a 1400°C.

Fuente: Autor.

Debido a que la distorsión en los componentes sinterizados es mayor cuando se promueve la formación de fase líquida, la mayor parte de los componentes en aceros de maquinaria así como de herramientas tipo H13 son sinterizados en fase o estado sólido, sin embargo, los componentes hechos en estos materiales son obtenidos por MIM donde el porcentaje en volumen de la carga metálica supera el 55% o 60%, obteniéndose menor porosidad en los componentes ya sinterizados, en donde se puede alcanzar hasta un 99% en densificación (Coleman et al. 2011), (Besler et al. 2017).

De igual manera sinterizar en presencia de fase líquida genera una mayor probabilidad de segregación de partículas de segunda fase como carburos, lo cual pudo evidenciarse en las pruebas de sinterización realizadas entre las temperaturas de 1300°C y 1400°C, como se observa en las Figuras 6b y 6d, a su vez de resaltar que se generó un mayor crecimiento de grano en los materiales que fueron sinterizados a 1400°C, siendo de 7-8 para el que fue sinterizado a 1300°C y de 5-6 para el que fue sinterizado a 1400°C, ambos medidos bajo la norma ASTM E112.

Si bien la porosidad obtenida en el material sinterizado a 1400°C es relativamente baja, su distorsión fue alta, por lo que una mayor presencia de carga metálica puede favorecer la densificación en el material, no obstante, es de mencionar que no solo la presencia de una mayor carga metálica promueve una mayor densificación dado que el tiempo al que se sinteriza el material es de igual manera un parámetro de estudio. En la figura 7 se muestra un prototipo de punzón para trabajo en caliente el cual fue sinterizado a 1400°C, mediante el mecanismo SLPS, presentando distorsión en algunas zonas.

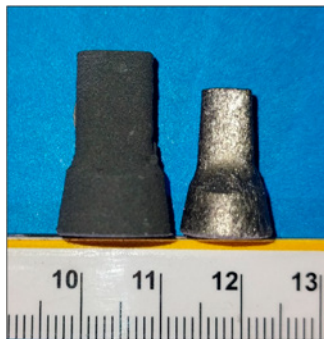


Figura 7. Prototipo de punzón para trabajo en caliente, izquierda prototipo impreso mediante MABE, derecha prototipo sinterizado 100% metal.

Fuente: Autor.

En cuanto al comportamiento mecánico de los materiales ya sinterizados se alcanzaron valores de durezas en la matriz de 693 ± 5 HV y en las zonas segregadas de carburos de 797 ± 5 HV, en vista que las segregaciones de carburos son perjudiciales por efecto que generan pérdida de tenacidad, puede pensarse en realizar un tratamiento térmico de solubilización y globalización para que de esta manera se recupere esta propiedad mecánica, así como que por efecto que el enfriamiento generado tras el proceso de sinterización generó precipitación bainítica en los bordes de los prototipos impresos y sinterizados.

4. Conclusiones

Acero de herramientas H13 fue procesado mediante MABE utilizando una máquina FDM lo que nos permitió concluir lo siguiente.

Mediante la ruta de obtención de componentes impresos y sinterizados se mostró la factibilidad técnica en lograr piezas 100% metálicas, haciendo uso de equipamiento de bajo costo como son las impresoras 3D de escritorio las cuales se enmarcan dentro de la industria 4.0.

La sinterización a bajas temperaturas sin formación de líquido y largos tiempos de proceso pueden lograr componentes funcionales para algunas aplicaciones. La sinterización por períodos prolongados mediante SLPS favorece la distorsión geométrica de piezas, prototipos, etc., siendo la sinterización en fase sólida una ruta alternativa para mantener una tolerancia geométrica específica.

Se logró identificar una ruta alterna a los procesos de mecanizado por los cuales los punzones para trabajo en caliente son fabricados y usados por la empresa IMAL. Lo anterior puede ser una oportunidad para la diversificación del mercado lo que puede permitir acortar el recambio de los componentes por efecto de los tiempos de importación en estos componentes, todo lo anterior permitiendo adoptar nuevas metodologías de trabajo que se encuentran dentro de la industria 4.0, no obstante, es necesario seguir realizando más

estudios, así como escalamiento de los prototipos realizados en términos de envergadura y de esta manera poder realizar pruebas reales de punzonado en caliente.

Los resultados encontrados son prometedores y plantean un punto de partida para la fabricación de aceros de herramientas mediante la llamada cuarta revolución industrial (Industria 4.0). Se requieren investigaciones futuras encaminadas en los postprocesos de tratamiento térmico, y acabado superficial de las herramientas obtenidas, así como su prueba en un ambiente real de punzonado en caliente.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Fundición y Pulvimetalurgia de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, y al Centro de Materiales y Ensayos del SENA, Regional Distrito Capital, por el apoyo logístico, técnico, humano y financiero del proyecto. Este trabajo fue financiado con recursos de los proyectos: PROMEMA 4.0 código 8183-SGPS y MABECOM Hermes código 47503.

Referencias

- Abel, Johannes et al. 2019. "Fused Filament Fabrication (FFF) of Metal-Ceramic Components." *Journal of Visualized Experiments* 2019(143): 1–13.
- Banerjee, S., and C. J. Joens. 2012. "Debinding and Sintering of Metal Injection Molding (MIM) Components." *Handbook of Metal Injection Molding (Mim)*: 133–80.
- Besler, Robert et al. 2017. "Effect of Processing Route on the Microstructure and Mechanical Properties of Hot Work Tool Steel." *Materials Research* 20(6): 1518–24.
- Cano, Santiago et al. 2019. "Additive Manufacturing of Zirconia Parts by Fused Filament Fabrication and Solvent Debinding: Selection of Binder Formulation." *Additive Manufacturing* 26(November 2018): 117–28. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.001>.
- Chniouel, Aziz. 2019. "Etude de l'élaboration de l'acier Inoxydable 316L Par Fusion Laser Sélective Sur Lit de Poudre : Influence Des Paramètres Du Procédé, Des Caractéristiques de La Poudre, et Des Traitements Thermiques Sur La Microstructure et Les Propriétés Mécaniques." : 145.
- Coleman, Andrew J. et al. 2011. "Effect of Particle Size Distribution on Processing and Properties of Metal Injection Moulded 4140 and 4340." *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials - 2011, Proceedings of the 2011 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, PowderMet 2011*: 41–412.
- DebRoy, T. et al. 2018. "Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties." *Progress in Materials Science* 92: 112–224.
- Ecker, J. V. et al. 2020. "Additive Manufacturing of Steel and Copper Using Fused Layer Modelling: Material and Process Development." *Powder Metallurgy Progress* 19(2): 63–81.
- Enneti, Ravi K., Seong Jin Park, Randall M. German, and Sundar V. Atre. 2012. "Review: Thermal Debinding Process in Particulate Materials Processing." *Materials and Manufacturing Processes* 27(2): 103–18.
- "FILLER CONTENT AND PROPERTIES OF HIGHLY FILLED FILAMENTS FOR Joamin Gonzalez-Gutierrez, Ivica Duretek and Clemens Holzer, Chair of Polymer Processing, Florian Arbeiter, Chair of Polymer Testing and Material Characterization, Montanuniversitaet." 2017. : 1–4.
- German, Randall M. 1986. "Densification of Prealloyed Tool Steel Powders: Sintering Model." *International journal of powder metallurgy*: 49–61.. 1999. "Computer Model for the Sintering Densification of Injected Molded M2 Tool Steel." *International journal of powder metallurgy*: 57–67.
- German, Randall M., Pavan Suri, and Seong Jin Park. 2009. "Review: Liquid Phase Sintering." *Journal of Materials Science* 44(1): 1–39.
- Godec, Damir, Santiago Cano, Clemens Holzer, and Joamin Gonzalez-Gutierrez. 2020. "Optimization of the 3D Printing Parameters for Tensile Properties of Specimens Produced by Fused Filament Fabrication of 17-4PH Stainless Steel." *Materials* 13(3).
- Gonzalez-Gutierrez, J. et al. 2017. "Shaping, Debinding and Sintering of Steel Components Via Fused Filament Fabrication." *16th International Scientific Conference on Production Engineering - CIM2017* (June). 2018. "3D Printing Conditions Determination for Feedstock Used in Fused Filament Fabrication (FFF) of 17-4PH Stainless Steel Parts." *Metalurgija* 57(1–2): 117–20.
- Gonzalez-gutierrez, J et al. 2016. "Fused Filament Fabrication for Metallic Parts." (April).
- Gonzalez-Gutierrez, Joamin et al. 2017. "Filler Content and Properties of Highly Filled Filaments for Fused Filament Fabrication of Magnets." *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings 2017-May*: 55–58.
- . 2018. "Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives." *Materials* 11(5).
- . 2019. "Tensile Properties of Sintered 17-4PH Stainless Steel Fabricated by Material Extrusion Additive Manufacturing." *Materials Letters* 248: 165–68. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>.
- Gonzalez-Gutierrez, Joamin, Sergio Carrillo De Hert, Bernd Steffen Von Bernstorff, and Igor Emri. 2014. "Prediction of Viscosity of Pim Feedstock Materials with Different Particle Size Distribution." *31st Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, DAS 2014 - Proceedings* (February 2015): 180–81.
- Gonzlez-Gutierrez, Joamn, Gustavo Beulke, and Igor Emri. 2012. "Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts." *Some Critical Issues for Injection Molding*.

- Jelis, Elias et al. 2015. "Metallurgical and Mechanical Evaluation of 4340 Steel Produced by Direct Metal Laser Sintering." *Jom* 67(3): 582–89.
- Kukla, C. et al. 2017. "The Production of Magnets by FFF-Fused Filament Fabrication." *Proceedings Euro PM 2017: International Powder Metallurgy Congress and Exhibition* (November).
- Kukla, Christian et al. 2016. "Properties for PIM Feedstocks Used in Fused Filament Fabrication." *World PM 2016 Congress and Exhibition* (October).
- Kukla, Christian, Joamin Gonzalez-Gutierrez, et al. 2017. "Effect of Particle Size on the Properties of Highly-Filled Polymers for Fused Filament Fabrication." *AIP Conference Proceedings* 1914(December 2017).
- Kukla, Christian et al. 2019. "Debinding Behaviour of Feedstock for Material Extrusion Additive Manufacturing of Zirconia." *Powder Metallurgy* 62(3): 196–204.
- Kukla, Christian, Ivica Duretek, Joamin Gonzalez-Gutierrez, and Clemens Holzer. 2018. "Rheology of Highly Filled Polymers." *Polymer Rheology*.
- Kukla, Christian, Joamin Gonzalez-gutierrez, Santiago Cano, and Stefan Hampel. 2017. "Fused Filament Fabrication (FFF) of PIM Feedstocks." *Proceedings of VI Congreso Nacional de Pulvimetalurgia y I Congreso Iberoamericano de Pulvimetalurgia* (July).
- Lengauer, Walter, Ivica Duretek, Markus Fürst, Viktoria Schwarz, et al. 2019. "Fabrication and Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Hardmetal and Cermet Components." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 82(February): 141–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.04.011>.
- Lengauer, Walter, Ivica Duretek, Markus Fürst, Joamin Gonzalez-Gutierrez, et al. 2019. "Fused-Filament Printing of Hardmetals and Cermets with Feedstock from RTP Powders." *Euro PM2019 - HM & AM Indirect Methods* (October).
- Myers, N. S., and D. F. Heaney. 2012. "Metal Injection Molding (MIM) of High-Speed Tool Steels." *Handbook of Metal Injection Molding (Mim)*: 516–25.
- Qaud, Nadia. 2018. 100 Sulzer Technical Review *Additive Manufacturing Technologies at Sulzer*.
- Rane, Kedarnath, Kevin Castelli, and Matteo Strano. 2019. "Rapid Surface Quality Assessment of Green 3D Printed Metal-Binder Parts." *Journal of Manufacturing Processes* 38(November 2018): 290–97. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.032>.
- Singh, Paramjot et al. 2020. "Estimating Powder-Polymer Material Properties Used in Design for Metal Fused Filament Fabrication (DfMF3)." *Jom* 72(1): 485–95. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03920-y>.
- Spoerk, Martin et al. 2018. "Effect of the Printing Bed Temperature on the Adhesion of Parts Produced by Fused Filament Fabrication." *Plastics, Rubber and Composites* 47(1): 17–24.
- Spoerk, Martin, Clemens Holzer, and Joamin Gonzalez-Gutierrez. 2020. "Material Extrusion-Based Additive Manufacturing of Polypropylene: A Review on How to Improve Dimensional Inaccuracy and Warpage." *Journal of Applied Polymer Science* 137(12): 1–16.
- Thompson, Yvonne, Joamin Gonzalez-Gutierrez, Christian Kukla, and Peter Felfer. 2019. "Fused Filament Fabrication, Debinding and Sintering as a Low Cost Additive Manufacturing Method of 316L Stainless Steel." *Additive Manufacturing* 30(May): 100861. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861>.
- Vaezi, Mohammad, Philipp Drescher, and Hermann Seitz. 2020. "Beamless Metal Additive Manufacturing." *Materials* 13(4).
- Yamanoglu, Ridvan, William Bradbury, Eugene A. Olevsky, and Randall M. German. 2013. "Sintering and Microstructure Characteristics of 42CrMo4 Steel Processed by Spark Plasma Sintering." *Metals and Materials International* 19(5): 1029–34.