



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL



**ESTUDIOS PARA LA MEJORA DE TECNOLOGÍAS
EMERGENTES DE PROTOTIPADO RÁPIDO
MEDIANTE TÉCNICAS EXPERIMENTALES**

**PRESENTADA POR:
GUSTAVO MEDINA SÁNCHEZ**

**DIRIGIDA POR:
RUBÉN DORADO VICENTE**

JAÉN, 1 DE JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE JAÉN



TESIS DOCTORAL

ESTUDIOS PARA LA MEJORA DE TECNOLOGÍAS
EMERGENTES DE PROTOTIPADO RÁPIDO MEDIANTE
TÉCNICAS EXPERIMENTALES

AUTOR

Gustavo Medina Sánchez

DIRECTOR

Dra. D. Rubén Dorado Vicente

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MINERA

JAÉN, JUNIO 2022

UNIVERSIDAD DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN TEP 250 INGENIERÍA MECÁNICA Y
ENERGÉTICA

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: “estudios para la mejora de tecnologías emergentes de prototipado rápido mediante técnicas experimentales” ha sido desarrollada en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén y dentro del grupo de investigación TEP250 Ingeniería Mecánica y Energética, y es presentada por el aspirante a doctor por la Universidad de Jaén D. Gustavo Medina Sánchez, bajo la dirección del Dr. Rubén Dorado Vicente.

Jaén, junio 2022

El doctorando

Fdo. Gustavo Medina Sánchez

El director de la Tesis

Fdo. Rubén Dorado Vicente

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer y reconocer a mi director de tesis, Rubén Dorado Vicente, la dedicación y atención que ha tenido conmigo durante la elaboración de esta tesis doctoral, y especialmente por confiar en mí en todo momento. Su dirección en forma de consejos, recomendaciones, pautas y lecciones ha sido muy enriquecedora, y han conseguido hacer de mí, un mejor investigador, docente y persona.

También quiero agradecerles a todos mis compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera su compañerismo y ayuda, pero especialmente quiero agradecerles a mis compañeros Diego Carou, Rafael López y Eloísa Torres, su constante ánimo y apoyo, sin el cual no sé si hubiera podido acabar esta tesis.

Quiero agradecerle que hayan compartido conmigo sus conocimientos, dedicación y tiempo, a los investigadores que me han acompañado durante este periodo de formación e investigación y que han compartido conmigo horas de trabajo para que llegue a buen fin. Rubén, Rafa, Eloísa, Alberto y Diego, muchas gracias.

Dejo para el final a los más importantes, mi familia. Gracias Aurora, Paula, Gustavo y Aurora por vuestra paciencia infinita, habéis sido los sufridores silenciosos de este periodo. Sin vuestro cariño y apoyo todo esto no tendría sentido. También quiero agradecerles a mis padres que siempre me hayan apoyado, y que desde pequeño me hayan inculcado los valores del trabajo constante, el esfuerzo y la superación.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	7
TABLA DE CONTENIDOS	8
RESUMEN	9
ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	10
PARTE 1: MEMORIA.....	11
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Concepto de prototipado rápido	11
1.2. Procesos de prototipado rápido.....	12
1.3. Procesos de fabricación aditiva.....	14
1.4. Procesos de deformación incremental	19
1.5. Fabricación por filamento fundido (FFF).....	20
1.6. Conformado por deformación incremental monopunto (SPIF).....	22
2. JUSTIFICACIÓN.....	24
3. OBJETIVOS	27
4. PUBLICACIONES.....	32
5. CONCLUSIONES DE LA TESIS.....	38
6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	41
6.1 Fabricación aditiva mediante procesos de extrusión.....	41
6.2 Procesos de deformación incremental	42
7. REFERENCIAS	44
PARTE 2: COMPENDIO DE PUBLICACIONES	47

RESUMEN

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido la aparición de nuevas tecnologías de fabricación con las que obtener productos de forma rápida, flexible y exclusiva. Estas tecnologías vienen a cubrir la demanda del mercado, que busca productos personalizados y de rápida adquisición.

Los procesos de prototipado rápidos son procesos de fabricación que proporcionan productos personalizados, en pequeños lotes a bajo coste, y con un alto grado de automatización e inmediatez. Estos procesos surgen inicialmente para generar prototipos funcionales o no funcionales de productos, con objeto de evaluarlos antes de afrontar una producción industrial de media o larga tirada. Pero actualmente, están evolucionando hacia la producción de objetos definitivos, con la aparición de una gran variedad de tecnologías y materiales que se adaptan a este nuevo concepto de fabricación. El apoyo que desde muchos sectores está recibiendo el concepto de industria 4.0 o industria conectada, está ayudando a que muchas empresas empiecen a cambiar el concepto de fabricación tradicional, en la búsqueda de una fabricación rápida, como en el caso del prototipado rápido, y concurrente en la que una interacción hombre-software-máquina más eficiente resulte en productos personalizados, de calidad, y de bajo impacto energético y ambiental.

Con objeto de mejorar el conocimiento y generar modelos que permitan predecir y mejorar el comportamiento de dos de estas tecnologías: deformación incremental monopunto e impresión 3D, en esta tesis se aplican técnicas metrológicas, experimentales, estadísticas y métodos de aproximación-interpolación.

A través de las metodologías desarrolladas en este trabajo podremos identificar las configuraciones de proceso óptimas para obtener productos con una calidad dimensional, superficial y/o mecánica adecuada, así como ayudar a reducir su huella de carbono e impacto energético a través de un mejor control de los tiempos de proceso. Estos métodos pueden aplicarse a otros procesos o tecnologías de fabricación en los que la forma final del producto dependa de la trayectoria seguida por una herramienta.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria de la tesis doctoral se compone de dos partes. En la primera parte se introduce la temática de la tesis, donde se explican los conceptos principales que la generan y se presenta un estado del arte con antecedentes y tendencias; se realiza una justificación de su desarrollo con una descripción de los objetivos a alcanzar y el conocimiento científico generado para alcanzarlos; y finalmente se exponen las principales conclusiones de los resultados obtenidos y se proponen futuras líneas de investigación.

En la segunda parte de la memoria se incluye un compendio de cinco artículos de investigación, realizados en el ámbito de esta tesis, publicados en revistas científicas de alto impacto y calidad reconocida, indexadas en las bases de datos bibliográficas ISI JCR, ISI WOS y/o Scopus.

PARTE 1: MEMORIA

La primera parte de esta tesis doctoral se estructura en siete apartados. Se inicia con una introducción donde se abordan aspectos generales de los procesos de prototipado rápido y se realiza un breve estado del arte de las dos tecnologías objeto de estudio. En el segundo punto se plantean los argumentos que han motivado la realización de esta tesis doctoral. El tercer punto define el objetivo principal de la tesis, explicando detalladamente los diferentes objetivos secundarios planteados para alcanzarlo. En el siguiente punto se realiza un resumen de las publicaciones científicas más relevantes surgidas del trabajo de investigación llevado a cabo, relacionándolas con los objetivos indicados en el punto anterior. El quinto punto expone las conclusiones obtenidas como consecuencia de los trabajos realizados, y el sexto punto propone futuras líneas de investigación para seguir avanzando en el conocimiento de las tecnologías estudiadas y plantear posibles usos innovadores de las mismas. Finalmente se termina con una relación de las principales referencias bibliográficas consultadas durante las distintas fases de esta tesis.

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende realizar una breve aproximación a los procesos de fabricación rápida, y más concretamente a los procesos de fabricación aditiva y a los procesos de conformado por deformación incremental.

El objetivo es introducir algunos conceptos generales sobre los procesos de fabricación que son objeto de estudio en esta tesis doctoral, los antecedentes existentes, los usos actuales de estos procesos y las tendencias en investigación más recientes.

1.1. Concepto de prototipado rápido

El término prototipado rápido o Rapid Prototyping (RP) se usa en diferentes sectores para definir procesos que generan soluciones rápidas de prueba que puedan servir de base o ensayo para el desarrollo de soluciones finales más elaboradas. Un ejemplo puede ser la creación de una maqueta interactiva de una aplicación digital con objeto de evaluar la experiencia de uso y poder corregir errores de diseño en una fase temprana del proyecto.

En el contexto del desarrollo de productos, el término RP se usa para describir procesos o técnicas que permiten la fabricación de prototipos físicos de piezas o componentes a partir de modelos digitales. Estos prototipos son usados principalmente en la fase de desarrollo de producto para visualizar el producto, hacer pruebas geométricas o de ensamblaje, o realizar ensayos en prototipos cuasifuncionales (Carter and Ieee 2001).

El alto coste de capital y tiempo que supone la generación de las herramientas, maquinaria o instalaciones necesarias para fabricar un producto, provoca la conveniencia de disponer de un prototipo físico que pueda fabricarse de forma económica y rápida. Las técnicas RP surgen para cubrir esta demanda, y acelerar la generación de prototipos que permitan la evaluación del producto y la corrección de posibles errores de diseño previos a la producción masiva. Esto supone un importante ahorro del tiempo y el coste de desarrollo de un producto.

Últimamente se está usado este concepto como sinónimo de impresión 3D o de fabricación aditiva, en inglés Additive Manufacturing (AM), ya que inicialmente las tecnologías de AM fueron desarrolladas para la creación prototipos. Pero esta analogía desvirtúa ambos términos, ya que las tecnologías de AM se usan para más propósitos que la creación prototipos, y no todos los procesos de generación rápida de prototipos se realizan con tecnologías AM.

La evolución tecnológica de muchos de los procesos usados para el prototipado rápido ha provocado que se esté extendiendo su funcionalidad, aplicándose no solo para la creación de prototipos sino también para la creación de piezas u objetos finales plenamente funcionales. Esto ha provocado que se esté introduciendo el concepto de fabricación rápida, en inglés Rapid Manufacturing (RM), como una evolución del RP. La RM engloba a muchos de los procesos asociados al RP, entre ellos a la fabricación aditiva y al conformado por defomación incremental, pero en su aplicación industrial, en la búsqueda de fabricar pequeños lotes de productos más personificados (Hernández Castellano 2015).

1.2. Procesos de prototipado rápido

Aunque las tecnologías que se usan para la fabricación de prototipos son muy variadas, todas presentan una estructura general semejante, que empieza con la creación de un modelo tridimensional digital del diseño a fabricar y concluye con la fabricación del modelo físico (Qiu et al. 2016). La estructura general del proceso se puede dividir en cuatro etapas (figura 1):

1. Modelado digital del objeto mediante un software CAD.
2. Definición de los parámetros del proceso mediante un software específico diferente para cada tecnología y/o fabricante.
3. Ejecución y control del proceso en máquina automatizada.
4. Obtención y posprocesado del objeto físico.

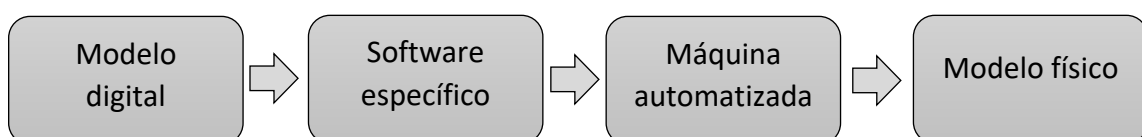


Figura 1: Esquema de la estructura general de los procesos de prototipado rápido

Desde un punto de vista muy general se pueden clasificar los procesos de fabricación de prototipos según su naturaleza en:

Procesos con eliminación de material:

Son los conocidos como procesos de mecanizado con Control Numérico Computerizado (CNC). Con ellos se crea un sólido tridimensional mecanizando un material bruto a partir del movimiento automático de una herramienta según una secuencia de códigos con las coordenadas del movimiento. Estos códigos pueden obtenerse automáticamente a partir de un modelo digital del sólido, mediante el uso de un software CAD/CAM especializado (Nafis et al. 2011).

Dentro de estos procesos podemos tener procesos de mecanizado convencional como el fresado o el torneado, combinación de ambos como el torno-fresado, o métodos de mecanizado especiales como la electroerosión o el mecanizado láser.

Una de las ventajas de estos procesos es la precisión dimensional, ya que pueden obtenerse prototipos que reflejen de forma muy fidedigna la geometría del modelo tridimensional diseñado digitalmente. Otra de las ventajas es la variedad de materiales disponibles para realizar el prototipo con un mismo proceso. Para prototipos rápidos suelen usarse materiales plásticos o metales blandos, pero estos procesos también permiten el uso de otros materiales, lo que implica la posibilidad de fabricar el prototipo con el material definitivo de diseño y, por lo tanto, la creación de prototipos funcionales que pueden ser ensayados o probados con un comportamiento mecánico idéntico al que tendrá la pieza final.

Procesos con adición de material:

Son los conocidos como procesos de fabricación aditiva, donde se crea un sólido tridimensional por adición de material en capas superpuestas. Existen diversas tecnologías atendiendo al tipo de material utilizado para formar el objeto físico y el estado físico en el que se presenta. En el punto 1.3 se realiza una descripción más detallada y una clasificación de estos procesos.

Otros Procesos:

Entre los procesos que permiten la fabricación rápida de piezas se encuentran los procesos de deformación incremental. Son procesos en los que se conforman chapas metálicas o láminas poliméricas mediante deformaciones locales producidas por la acción de una herramienta o punzón en movimiento. En estos procesos el modelo digital permite diseñar las trayectorias a seguir por el punzón que son las que indicarán las zonas donde se producirán estas deformaciones locales y determinarán la geometría final de la pieza fabricada. Estas técnicas destacan por su bajo costo, su buena capacidad

de conformado y su flexibilidad. En el punto 1.4. se realiza un acercamiento más profundo a estos procesos describiendo las configuraciones más habituales.

Otros procesos que permiten la fabricación de prototipos sin un alto coste de desarrollo son los procesos de solidificación. Entre ellos se encuentran las conocidas como técnicas de fabricación de herramientas rápidas o herramientas suaves (rapid tools o soft tools, en inglés) que permiten la creación de moldes de silicona para la fabricación de prototipos o pequeñas tiradas de piezas por inyección de plástico. Los moldes se crean a partir de un modelo físico tridimensional, usualmente creado por AM a partir de un modelo digital, que se recubre de silicona. Tras un proceso de curado de la silicona, se forma un molde flexible con el negativo del modelo. Este molde permite fabricar el modelo físico final (Zivanovic et al. 2020).

Otra tecnología de solidificación es la fundición rápida (rapid casting en inglés). Consiste en la integración de la digitalización y la fabricación aditiva en los procesos de fundición tradicionales. Se usan tecnologías de prototipado rápido para la generación de los modelos, patrones o insertos necesarios para el proceso de fundición de forma directa (direct tooling), o para la fabricación de los moldes que generarán estos componentes (indirect tooling). Estos elementos y herramientas se fabrican a partir de modelos digitales, lo que permite flexibilizar el proceso de fundición. El modelo físico final se obtiene por un proceso de fundición tradicional (Thomas et al. 2018).

1.3. Procesos de fabricación aditiva

En las últimas décadas, la fabricación aditiva es tendencia mundial, y es reconocida como una de las tecnologías emergentes claves por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD 2017). Las diferentes tecnologías de fabricación aditiva simplifican el proceso productivo y encajan muy bien con la idea de fábrica inteligente (smart factory), lo que hace de la fabricación aditiva una de tecnologías conductoras de la última revolución industrial, la Industria 4.0 (Ghobakhloo 2018).

Su flexibilidad, el bajo tiempo de desarrollo de producto o el ahorro de material son algunas de las razones que han impulsado el interés en las diferentes tecnologías de fabricación aditiva (Schniederjans 2017). Se pueden encontrar muchas aplicaciones en campos tan diversos como la medicina con la bioimpresión de implantes y órganos (Gibson, Rosen and Stucker 2010), el mantenimiento industrial o la gestión de recambios (Muir and Haddud 2018), la reparación de piezas rotas o la generación de piezas únicas (Shewbridge 2014), el desarrollo de utillaje rápido (Rapid Tooling) (Boparai, Singh and Singh 2016), demostradores para la educación (Snyder et al. 2014), etc.

La fabricación aditiva se caracteriza por la fabricación de piezas a partir de un modelo digital CAD a través de la generación y unión de capas de material superpuestas que reproducen el modelo físico tridimensional. El número de tecnologías de fabricación

aditiva y sus aplicaciones no han parado de aumentar en los últimos años. La norma ISO/ASTM52900:2021 agrupa las distintas tecnologías en siete tipos de procesos dependiendo del tipo de material depositado y del tipo de unión física que se efectúa.

1. Extrusión de material: El material se funde y es depositado selectivamente a través de un extrusor, formando capas bidimensionales. La tecnología principal es FFF (del inglés Fused Filament Fabrication), también conocida por su término comercial FDM (del inglés Fused Deposition Modeling).
2. Fotopolimerización: Una luz ultravioleta cura de forma selectiva y por capas, ciertas zonas de un lecho de fotopolímero líquido. Los procesos de fotopolimerización más utilizados son SLA (del inglés Stereolithography), DLP (del inglés Digital Light Processing) y CDLP (del inglés Continuous Digital Light Processing).
3. Fusión de polvo: Una fuente térmica de alta energía funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de material en polvo formando capas. Dentro de este grupo se encuentran las tecnologías SLS (del inglés Selective Laser Sintering), SLM (del inglés Selective Laser Melting), EBM (del inglés Electron Beam Melting) y MJF (del inglés Multi Jet Fusion).
4. Proyección de material: Se depositan por capas gotas de material líquido fotosensible (fotopolímeros y ceras) y se curan aplicando una fuente de calor o una luz ultravioleta. MJ (del inglés Material Jetting), NPJ (del inglés NanoParticle Jetting) y DOD (del inglés Drop On Demand) son sus tecnologías más desarrolladas.
5. Proyección de aglutinante: Se emplea un adhesivo líquido proyectado sobre un lecho de material en polvo para unirlos formando capas superpuestas. La tecnología principal es BJ (del inglés Binder Jetting).
6. Deposición de energía focalizada: Se emplea una fuente de energía térmica para calentar y unir material en polvo a medida que se deposita. Las dos tecnologías más desarrolladas de este grupo son LENS (del inglés Laser Engineering Net Shape) y EBAM (del inglés Electron Beam Additive Manufacturing).
7. Laminado de hojas: La pieza se forma al unir láminas de material cortadas con su contorno. La tecnología es conocida como LOM (del inglés Laminated Object Manufacturing).

La fabricación aditiva permite la generación de piezas con una gran variedad de materiales. La materia prima a utilizar, el estado físico y la forma de suministro difieren para cada una de las tecnologías; se pueden usar metales, polímeros o materiales cerámicos, los cuales se suministran en estado sólido o líquido, y formando láminas,

filamentos o polvo (Bourell et al. 2017). En la Figura 2 se muestran las siete categorías en las que se dividen los procesos de fabricación aditiva, con indicación del estado físico y el tipo de materia prima utilizada para cada una de las tecnologías asociadas a cada categoría.

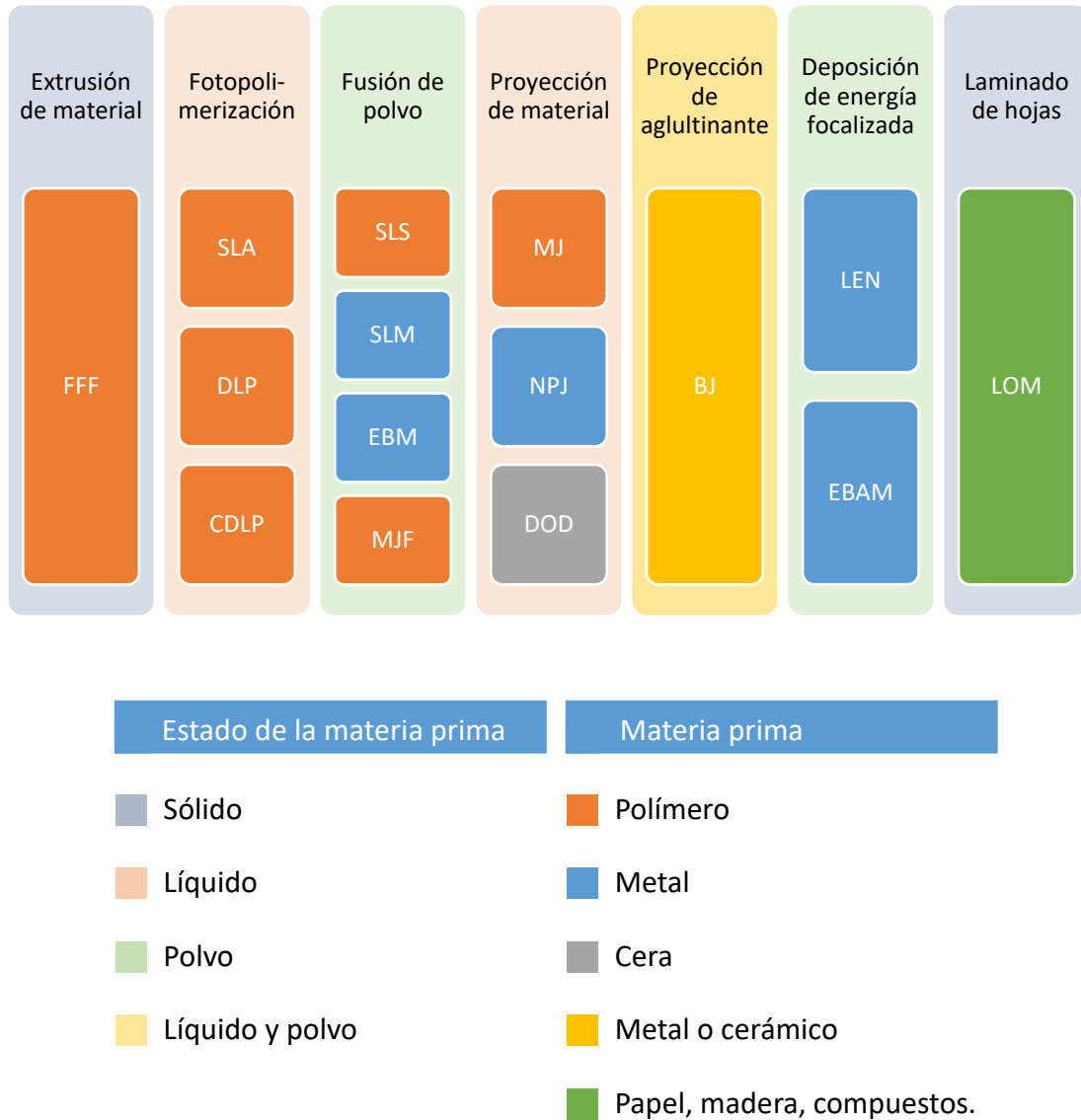


Figura 2: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva. Estados y tipos de materia prima empleada.

Aunque la fabricación aditiva engloba tecnologías muy diferentes, las principales etapas que se siguen para la ejecución de los procesos son muy similares. Se parte de un sólido tridimensional modelado digitalmente con un software CAD, que es la representación digital de la pieza u objeto que se pretende fabricar. El modelo digital se discretiza y se almacena en un archivo con un formato compatible con el software que gestiona el proceso. El formato más utilizado en las tecnologías de fabricación aditiva es el STL. Este formato discretiza la superficie exterior del objeto tridimensional aproximándola con una malla cerrada formada por planos triangulares. Este formato solo tiene en cuenta la geometría, sin añadir la información sobre color, textura o propiedades físicas que otros

formatos CAD sí almacenan. La precisión de la aproximación realizada será mayor cuanto más pequeño sea el triángulo del mallado. La fabricación aditiva genera las piezas por superposición de capas horizontales, por lo que la geometría de la superficie exterior en cada una de las capas se obtiene a partir de las rectas resultantes de cortar cada triángulo por un mismo plano horizontal. Este proceso se conoce como laminación y se realiza con la asistencia de un software laminador o slicer. Este software será diferente para cada tecnología de fabricación aditiva adaptándose a las características de cada una de ellas y de la máquina utilizada. Este software también permitirá configurar los parámetros significativos del proceso, como el material utilizado, la velocidad de generación del material, la altura entre capas, el uso de soportes, etc. Una vez configurado el proceso se generará un código que se transmite a la máquina para que genere la pieza capa a capa. Dependiendo de la tecnología utilizada puede ser necesario llevar a cabo tareas de posprocesado como el curado o secado de la pieza, la eliminación de soportes, o la eliminación de restos de material (Livesu et al. 2017, Gibson et al. 2010).

En la figura 3 se presentan de forma esquemática las diferentes etapas de un proceso de fabricación con fabricación aditiva, desde el modelo digital hasta el objeto físico tridimensional.

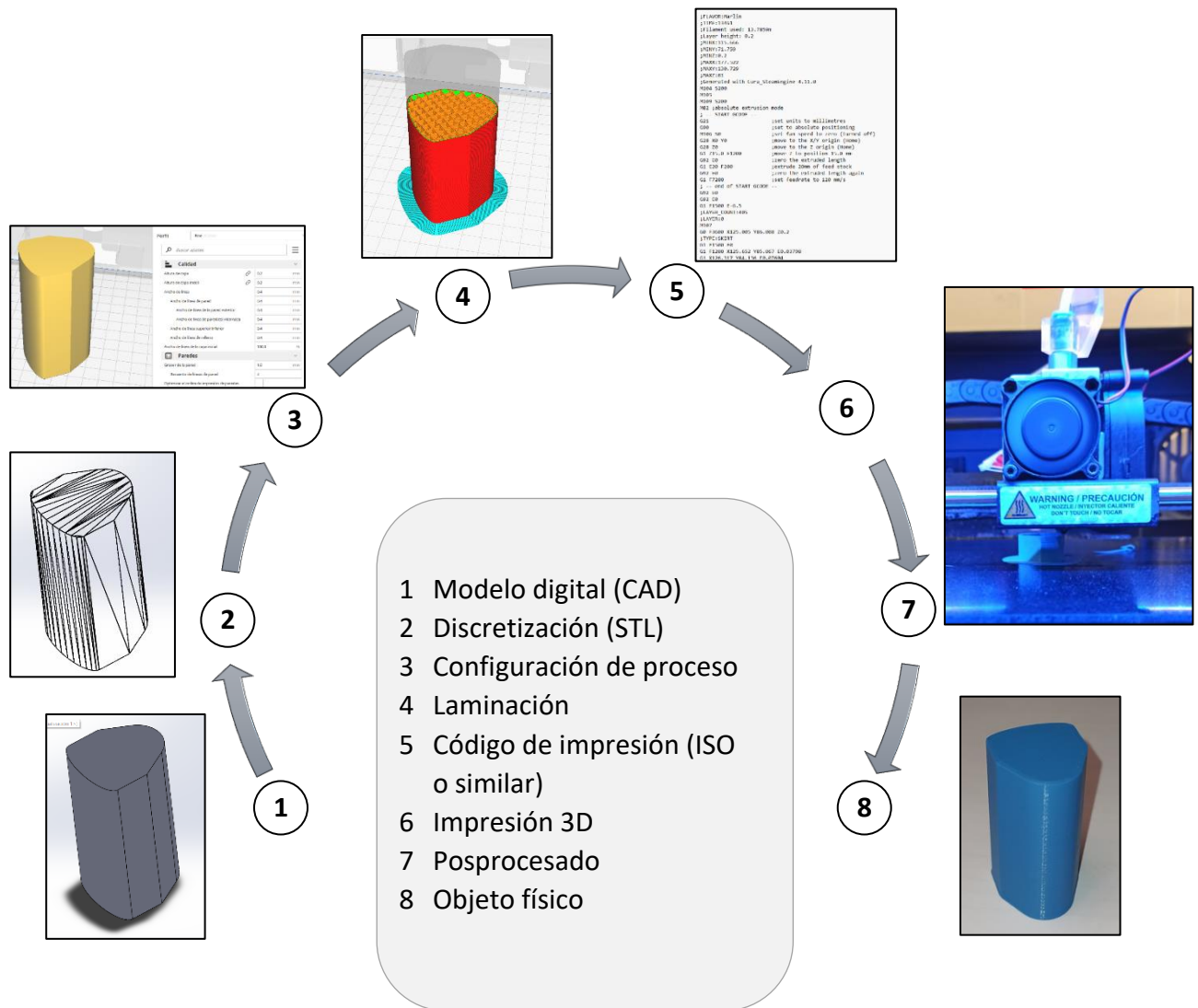


Figura 3: Etapas de un proceso de fabricación aditiva

Cada una de las tecnologías AM ha tenido un desarrollo desigual desde su creación, en función del su uso, su complejidad o simplemente el interés mostrado por empresas u organismos en su desarrollo. Pero posiblemente sea la FFF la tecnología de fabricación aditiva que más interés ha generado a nivel general. Desde que su patente expiró en 2009, ha sido la tecnología que más se ha extendido, en parte gracias al éxito que las económicas máquinas FFF clónicas han tenido entre los usuarios particulares y los pequeños centros de investigación. A pesar de que no es la tecnología AM más precisa, cada vez más empresas e instituciones la están usando por su bajo coste, la variedad de plásticos que pueden usarse y la resistencia de las piezas fabricadas comparadas con otras tecnologías AM (Noorani 2018).

1.4. Procesos de deformación incremental

Los procesos de deformación incremental se desarrollaron a finales de los años 20 como una solución de fabricación de prototipos y pequeños lotes de piezas a partir de chapas metálicas (Matsubara, Tanaka and Nakamura 1996). Surgen como una evolución de procesos más clásicos como el repujado o entallado, donde se deforma una chapa metálica en un torno convencional por la acción de un rodillo que la presiona sobre una matriz para crear una pieza de revolución con la forma de la matriz. Los procesos de deformación incremental adaptan esta idea a una máquina de control numérico (CN). Una herramienta o punzón sigue una trayectoria tridimensional marcada por el CN, y a su paso va deformando progresivamente una chapa plana que se encuentra sujeta por un marco rígido hasta conseguir la forma deseada (Hagan and Jeswiet 2003).

Los procesos de deformación incremental se caracterizan por su bajo coste, ya que no es necesario crear matrices, prensas o utillaje complejo; y por su excelente formabilidad en comparación con otros procesos de conformado tradicionales (Maqbool and Bambach 2017). En los últimos años estos procesos han despertado gran interés como solución para la fabricación rápida de piezas de chapa, lo que ha extendido su estudio desde las chapas metálicas con las que se desarrollaron en sus inicios, a las láminas poliméricas (Martins et al. 2009). Algunos campos donde se están aplicando estos procesos son la industria aeronáutica (Hussain and Al-Ghamdi 2014), la industria automovilística (Jeswiet, Hagan and Sme 2002) o la biomedicina (Lu et al. 2016).

Los principales procesos de deformación incremental presentan tres variaciones dependiendo de la configuración y número de punzones o del uso de moldes (Jeswiet 2005).

1. Deformación incremental monopunto o Single Point Incremental Forming (SPIF). La deformación la produce un único punzón con un movimiento en el plano XY y realizando pequeños incrementos en Z. La placa se deforma libremente al paso del punzón. La forma final de la pieza dependerá de la trayectoria seguida por el punzón y de la geometría del marco inferior que sujeta a la placa.
2. Deformación incremental con punzón de seguimiento. La deformación de la chapa se realiza con la acción de dos punzones que se mueven con una misma trayectoria. Uno de los punzones actúa sobre la cara superior de la chapa y el otro sobre la inferior.
3. Deformación incremental con dos puntos o Two-Point Incremental Forming (TPIF), que puede ser con molde parcial o total. En esta variante se utiliza un molde con el negativo de la forma que se quiere alcanzar que es la que actúa como segundo punto de deformación. El molde ayuda a disminuir las fuerzas de

deformación y a mejorar la precisión dimensional. El molde puede ser una reproducción completa de la geometría deseada, tipología TPIF con molde total, o una simplificación, tipología TIPF con molde parcial.

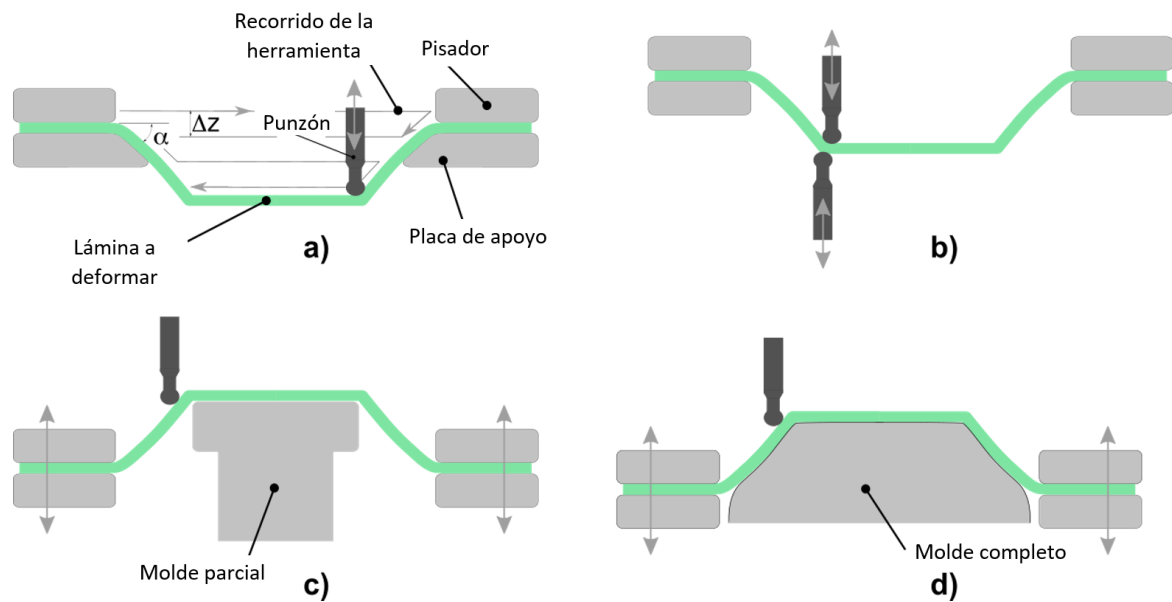


Figura 4: Principales configuraciones de deformación incremental. a) Deformación incremental monopunto (SPIF); b) deformación incremental con punzón de seguimiento; c) deformación incremental con dos puntos (TIPF) y molde parcial; d) deformación incremental con dos puntos (TPIF) y molde completo.

De estos procesos, el SPIF es el más flexible y el más fácil de implementar a un coste bajo, pero debido a su simplicidad, sus mecanismos de deformación son más complejos y su precisión dimensional más limitada, por lo que su implementación en aplicaciones industriales sigue siendo un reto a día de hoy.

1.5. Fabricación por filamento fundido (FFF)

La tecnología FFF pertenece a los procesos de fabricación aditiva por extrusión de material, y se basa en el calentamiento y posterior extrusión de un filamento de material termoplástico. El extrusor tiene movimiento en el plano horizontal (X-Y) y al desplazarse va depositando el material extruido formando capas horizontales. Al ser depositado el material disminuye rápidamente su temperatura y solidifica. Este proceso se va repitiendo por capas, siendo la superposición de estas capas la que forma el objeto sólido tridimensional (Jin et al. 2009).

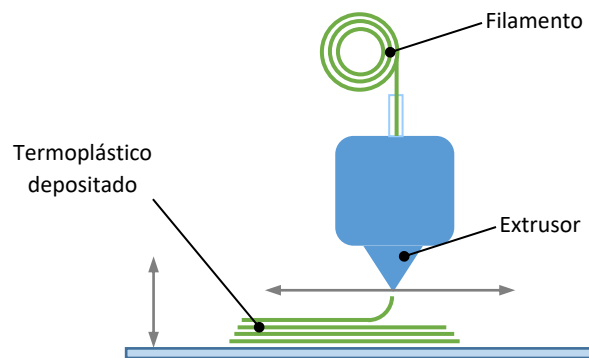


Figura 5: Esquema de movimiento proceso FFF

Existen diferentes configuraciones de la tecnología FFF según se realice el movimiento del extrusor. Configuración cartesiana, que es la más extendida, donde el movimiento se realiza en los ejes cartesianos XYZ; configuración delta, donde el extrusor está sujetado por tres barras articuladas sujetas a tres montantes verticales que forman un triángulo; configuración polar, que es similar a la cartesiana pero con el movimiento definido por un sistema polar de coordenadas; y configuración SCARA (del inglés Selective Compliance Assembly Robotic Arm), que se basa en el movimiento de un brazo robótico articulado industrial. Las impresoras FFF con configuración cartesiana son las más utilizadas, principalmente por su sencillez y su bajo coste de inversión y operación.

La tecnología FFF tiene algunas ventajas reseñables frente a las tecnologías de conformado de polímeros tradicionales, como la flexibilidad de los diseños, la poca inversión necesaria, o el escaso tiempo requerido para la planificación y ejecución del proceso. En comparación con otras tecnologías AM, la tecnología FFF es posiblemente la más sencilla, tiene una gran variedad de materiales poliméricos que pueden ser utilizados, y una más que aceptable precisión dimensional y resistencia de las piezas fabricadas. A pesar de estas ventajas, la tecnología tiene aún algunas limitaciones que deberá de ir mejorando para ser más competitiva, como la baja velocidad de impresión, el pobre acabado superficial de las piezas, la excesiva proliferación de defectos de fabricación, la anisotropía de las piezas, o la gran dependencia del resultado final de la correcta combinación de los parámetros del proceso (Cano-Vicent et al. 2021).

Para paliar sus limitaciones las investigaciones se están centrando en aspectos tan diversos como el desarrollo y uso de nuevos materiales (Banerjee et al. 2019), la precisión dimensional y el acabado superficial (Barrios and Romero 2019, Plaza et al. 2019), las propiedades mecánicas de las piezas impresas, la discretización de los modelos CAD, la optimización de la forma y la orientación de la pieza, o el tiempo de fabricación (Oropallo and Piegl 2016, Thompson et al. 2016).

Las características del FFF han provocado un rápido desarrollo de la tecnología, usándose actualmente en multitud de aplicaciones, las cuales no dejan de

incrementarse cada día. Entre ellas se puede citar aplicaciones en disciplinas tan dispares como la biomedicina, para la fabricación de implantes y modelos de órganos o la generación de estructuras biocompatibles (Redaelli et al. 2020, Haffner et al. 2018, Dong and Lv 2016), la industria automovilística y aeroespacial (Romero et al. 2021, Wickramasinghe, Do and Tran 2020), la arquitectura (Huang et al. 2019), la industria textil (Melnikova, Ehrmann and Finsterbusch 2014), y por supuesto la fabricación de prototipos.

1.6. Conformado por deformación incremental monopunto (SPIF)

El proceso SPIF, es el proceso de conformado por deformación incremental más sencillo y económico, ya que para llevarlo a cabo solo se necesita un elemento que sujete a la chapa y otro que la deforme localmente. La composición más básica consta de una estructura de soporte que contiene un dispositivo de sujeción, un punzón y un sistema de posicionamiento. El dispositivo de sujeción está compuesto por una placa de apoyo y un pisador, y su principal cometido es mantener fija la posición de la placa para evitar su deslizamiento durante el proceso de deformación. El punzón será el elemento que produzca la deformación local de la chapa, y su geometría tiene una gran influencia en las fuerzas de conformado y en la forma final de la pieza deformada. Como sistema de posicionamiento se pueden usar máquinas de control numérico específicas, pero lo más común es adaptar una fresadora CNC para ejecutar el proceso. El sistema de posicionamiento controlará la posición y la velocidad del punzón a lo largo de la trayectoria programada (Duflou et al. 2018).

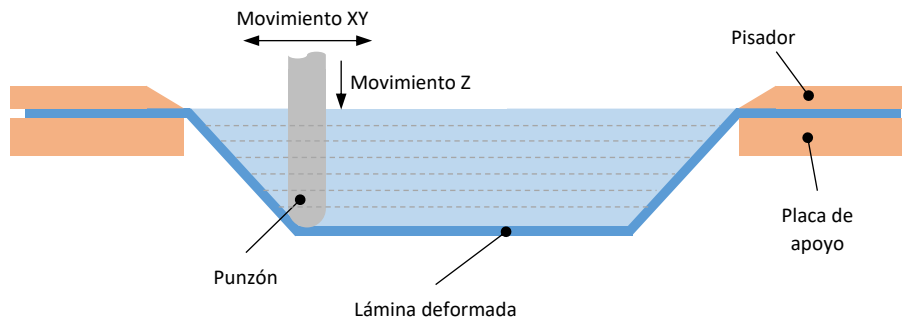


Figura 6: Esquema del proceso SPIF

El esquema de ejecución del proceso SPIF es sencillo. Se parte de una geometría tridimensional, normalmente diseñada digitalmente con un software CAD. Se obtiene la geometría de la superficie tridimensional que debe recorrer el punzón para deformar progresivamente la chapa o lámina. Esta superficie se divide en planos horizontales separados una misma distancia, lo que proporcionará la trayectoria horizontal que seguirá el punzón en cada plano. Para geometrías sencillas estas trayectorias se pueden calcular directamente, para geometrías complejas se pueden obtener adaptando las aplicaciones para mecanizado de los software CAD/CAM. Se programa el código ISO con las instrucciones para la máquina de control numérico y se ejecuta.

La geometría final resultante de la chapa deformada dependerá de los parámetros funcionales del proceso como el material utilizado, el espesor de la chapa, la velocidad del punzón, el uso de lubricante o la temperatura del proceso, y de los parámetros geométricos como la profundidad de deformación, el ángulo de inclinación de la pared, y el tamaño y la forma del punzón.

El proceso SPIF comparte las principales características de los procesos de prototipado rápido como la rapidez de planificación y ejecución, la flexibilidad y el bajo coste, lo que lo hace un proceso ideal para la producción de lotes pequeños personalizados. Pero además tiene algunas otras ventajas como la capacidad para fabricar piezas definitivas, las bajas fuerzas de conformado necesarias comparadas con otros procesos de conformado de chapa, la formabilidad de las piezas o el bajo coste de las herramientas necesarias. Estas características han supuesto que este proceso pueda competir con otros procesos de conformado de chapa tradicionales. Pero aún tiene algunos aspectos a mejorar que limitan su uso masivo a nivel industrial, como la precisión de la pieza final, el acabado superficial de la superficie de contacto con el punzón, el tiempo de ejecución del proceso o la excesiva reducción del espesor de la chapa para grandes deformaciones (Li et al. 2017).

La mayoría de los trabajos de investigación relacionados con el proceso SPIF se han focalizado en la deformación de chapas metálicas. Últimamente el conformado de láminas poliméricas ha despertado el interés de numerosos investigadores y se han realizado bastantes progresos en su estudio. El proceso de deformación de las láminas poliméricas es más complejo, por lo que la mayoría de las investigaciones se han focalizado en el análisis de los mecanismos de deformación y fallo, la formabilidad, la calidad del acabado y la influencia de los distintos parámetros de proceso, los cuales dependen en gran medida del tipo de termoplástico que se deforme (Zhu, Ou and Popov 2020).

2. JUSTIFICACIÓN

La mejora de la técnica ha permitido que en los últimos años se desarrollen nuevas tecnologías de fabricación que permiten obtener productos de una forma más ágil y flexible que los procesos de fabricación más tradicionales. Son tecnologías que ahorran tiempo y dinero al minimizar la necesidad de útiles, piezas y operaciones, con un concepto de fabricación que simplifica la relación entre diseño y producto. Algunas de estas tecnologías surgieron para realizar prototipos experimentales, pero ya forman parte de lo que se denomina procesos de fabricación rápida. Son tecnologías que encajan muy bien en la filosofía de la Industria 4.0 por su concepción digital, su flexibilidad, su inmediatez, su eficiencia energética o su alto grado de automatización.

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, la tecnología FFF está en auge principalmente por ser muy accesible y económica, y por producir piezas de manera flexible y con un bajo tiempo de desarrollo. Pero sigue teniendo algunos retos pendientes relacionados principalmente con las tolerancias geométricas y la calidad del acabado superficial, el alto tiempo de generación de las piezas, o la diversificación de los materiales utilizables.

La propia naturaleza de la tecnología FFF hace que sea inevitable que el tiempo de fabricación de las piezas sean alto comparado con otras tecnologías de conformado de polímeros como la inyección, la extrusión o el termoconformado. Aun así, aunque esta tecnología no llegue nunca a los niveles de producción de las tecnologías mencionadas, se debe hacer un esfuerzo en optimizar el tiempo de impresión de las piezas para que sea una tecnología atractiva desde el punto de vista empresarial. La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha relacionados con la optimización del tiempo de fabricación, se han centrado en relacionar la geometría de la pieza o su posición de impresión con el tiempo necesario para generarla. Dando como resultado recomendaciones de diseño o de posicionamiento de la pieza que minimizan los recorridos a realizar por el extrusor, y por tanto su tiempo de generación. Pero no se han realizado estudios sobre la influencia que la naturaleza de la trayectoria seguida por el extrusor puede tener en la velocidad de avance del mismo. El movimiento del extrusor se realiza por la acción de varios motores paso a paso, que irán adaptando su velocidad a las necesidades de la trayectoria según las indicaciones marcadas por el control numérico. Una trayectoria con una curvatura suave permitirá segmentos de interpolación más largos que favorecerá alcanzar la velocidad de avance máxima programada, mientras que para seguir una trayectoria cambiante serán necesarios segmentos de interpolación cortos, de manera que el motor puede que no llegue a alcanzar dicha velocidad. Este hecho se pone de manifiesto al imprimir cualquier pieza y comprobar que el tiempo real de impresión es mucho mayor que el tiempo teórico necesario si se imprimiera a la velocidad de avance programada.

En esta tesis se ha realizado un estudio de cómo varía la velocidad del extrusor en función de la naturaleza de la trayectoria programada. Conocer esta relación velocidad-trayectoria permitirá estudiar nuevas estrategias para generar las trayectorias basadas en la optimización de la velocidad de los motores y no solo en la geometría de la pieza. Esto permitiría minimizar los tiempos de fabricación al poder recorrerse las trayectorias a la máxima velocidad posible. Otra consecuencia de dicho conocimiento es poder predecir con un alto grado de exactitud el tiempo real de fabricación. Como se ha comentado anteriormente, el tiempo real de fabricación dista mucho del tiempo teórico, que suele ser el indicado en la mayoría de los softwares laminadores. Una correcta predicción del tiempo de procesado es fundamental para la correcta planificación de cualquier proceso productivo, y es clave para poder calcular los costes reales de producción y analizar su impacto ambiental. En la tecnología FFF, donde el alto tiempo de procesado es una de sus mayores desventajas, se hace aún más patente la necesidad de conocer el tiempo real de procesado. Para resolver este problema en esta tesis se propone una metodología empírica-analítica y un algoritmo de cálculo que permite obtener una predicción precisa del tiempo real de fabricación de una pieza impresa con la tecnología FFF.

Otro de los inconvenientes de la tecnología FFF es el pobre acabado superficial que presentan las piezas imprimidas. Todas las piezas imprimidas con una impresora de tecnología FFF presentan una característica textura escalonada en sus superficies exteriores. Esto se debe a que las piezas se generan por la superposición de capas horizontales de material termoplástico que se funde, se deposita y luego se solidifica; lo que imposibilita que haya una continuidad superficial del material. Existen diferentes técnicas de posprocesado que tratan de eliminar o enmascarar esta rugosidad, como el lijado o mecanizado de las superficies, la exposición en acetona, o la aplicación de pinturas o vinilos. Pero estas técnicas además de suponer un coste económico y aumentar aún más el tiempo de procesado, tienen un alto impacto sobre la precisión dimensional de la pieza. La dependencia de la rugosidad superficial con algunos de los parámetros del proceso, como la altura de capa, se ha puesto en evidencia en bastantes estudios. Pero no hay una evidencia clara de cuáles son los parámetros técnicos del proceso que tienen más influencia en la rugosidad de la pieza. Conocer cuáles son los parámetros significativos del proceso y su influencia en la rugosidad, permitirá optimizar sus valores y mejorar el acabado de las piezas. En esta tesis se realizará un estudio experimental y un análisis estadístico de resultados para identificar los parámetros críticos del proceso en relación con la rugosidad superficial.

Dentro del conformado de chapas metálicas o láminas poliméricas, los procesos de deformación incremental, y más concretamente la tecnología SPIF, supone una gran innovación, ya que permite la obtención de geometrías complejas con diseños flexibles sin necesidad de fabricar costosas matrices. Esta tecnología permite conformar una chapa a partir de un diseño digital de forma automática a costa de un alto tiempo de

procesado, por lo que está indicada para geometrías complejas con producciones muy cortas. Para que tanto la precisión dimensional como el acabado de las chapas conformadas sean adecuados, es necesario conocer la influencia que sobre ellos tienen los diferentes parámetros del proceso. En esta tesis se realiza un estudio experimental del efecto de los principales parámetros del proceso SPIF sobre las fuerzas de conformado y el acabado al trabajar láminas de polímeros. Este conocimiento permitirá realizar dos modelos, uno numérico y otro semianalítico, para calcular y predecir las fuerzas de conformado que se producen en el proceso de deformación para una geometría deseada. Estos modelos se pueden utilizar como herramientas para prediseñar de forma optimizada el proceso y minimizar el consumo energético del mismo.

La presente tesis doctoral pertenece al Programa de Doctorado en Energías Renovables, y se enmarca dentro de la Línea de Investigación en Ingeniería Mecánica, Energética y Ambiental. El conocimiento generado con esta tesis doctoral permitirá tener un conocimiento más profundo de las dos tecnologías estudiadas, lo que ayudará a optimizarlas, mejorar sus resultados y reducir su consumo energético. Eliminar o suavizar los defectos que aún presentan estas tecnologías emergentes ayudará a extender y diversificar su uso. El uso de procesos de prototipado rápido o fabricación rápida permite obtener piezas únicas o de baja producción de forma más económica y con menor gasto energético que los procesos de fabricación tradicionales. Estas tecnologías no solo pueden cubrir las necesidades de un mercado muy cambiante que demanda productos exclusivos con alto grado de inmediatez, sino que encajan en el concepto de industria 4.0, por su alto grado de digitalización y automatización, y su eficiencia energética. Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo y uso de estas tecnologías puede ayudar a reducir la producción de plásticos, ya que ambas tecnologías usan materiales termoplásticos que pueden provenir de materiales reciclados y que pueden a su vez volver a ser reciclados tras su uso. De hecho, el material que se ha usado en la tecnología FFF es el ácido poliláctico (PLA), que es un termoplástico fabricado a partir de recursos naturales y es biodegradable.

3. OBJETIVOS

En esta tesis se plantea como objetivo principal el evaluar mediante métodos experimentales y semianalíticos dos procesos de prototipado rápido de bajo coste como son el proceso de deformación incremental monopunto (SPIF) y la fabricación por filamento fundido (FFF). Al ser procesos de bajo coste y poco consumo energético, es fundamental optimizarlos para que sean competitivos, y puedan en un futuro cercano ser una alternativa real a los procesos de fabricación tradicionales.

La evaluación se centrará en encontrar y estudiar la influencia de los parámetros de proceso geométricos y funcionales más significativos, y su influencia en los tiempos de procesado, acabados o fuerzas de conformado, según el caso. Este conocimiento proporcionará herramientas y metodologías para identificar y optimizar dichos parámetros y conseguir procesos más eficientes, que consuman menos energía y tengan mejores resultados.

Para alcanzar el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos secundarios.

1. Estudiar la influencia de la geometría de la trayectoria seguida por el extrusor en el tiempo de procesado en FFF.

En los procesos de fabricación aditiva con la tecnología FFF las piezas se generan a partir de la extrusión de un polímero termoplástico. El movimiento del extrusor hace que el material se deposite en capas planas que superpuestas forman la pieza tridimensional. El movimiento se realiza entre puntos cuyas coordenadas se recorren de forma secuencial mediante interpolaciones lineales o curvas. La codificación de las trayectorias se basa en el lenguaje ISO, que es el que se utiliza en otras máquinas de control numérico como las fresadoras CNC.

El tiempo empleado en recorrer toda la trayectoria depende de numerosos factores, algunos relacionados con el diseño de la impresora, como las características de los motores o el tipo de control, otros con la geometría de la pieza, como el tamaño de pieza o su posición, y otros relacionados con la ejecución del proceso, como los parámetros de impresión o la trayectoria programada. La mayoría de los trabajos relacionados con el estudio del tiempo de fabricación, están enfocados a optimizar de forma experimental los parámetros de impresión o la posición y geometría de la pieza a fabricar. La mayoría de estos trabajos simplifican el problema al aproximar el tiempo de fabricación como el cociente entre la longitud total del recorrido de impresión y la velocidad programada. Esta aproximación introduce bastante error puesto que la velocidad real no permanece constante durante toda la trayectoria; se producen constantes aceleraciones y desaceleraciones del extrusor que alejan el valor de su velocidad real de la velocidad teórica que se ha programado.

Se plantea como objetivo estudiar cómo varía la velocidad real del extrusor en función de las características de los intervalos en los que se divide la trayectoria. En principio para segmentos de longitud elevada la velocidad alcanzada por el extrusor será semejante a la programada, pero no ocurrirá lo mismo en segmentos cortos o en aquellos en los que haya una variación brusca de dirección, ya que éstos requerirán de una deceleración importante de los motores que accionan el extrusor. El estudio se centrará en determinar de forma experimental cómo afecta a la velocidad real del extrusor, y con ello al tiempo de procesado, la tipología de las trayectorias programadas. Para ello se diseñarán trayectorias con diferentes longitudes y cambios de dirección que serán ejecutadas en diferentes impresoras para estudiar la relación entre la velocidad real y la programada.

2. Desarrollar un método de cálculo para realizar una estimación precisa de los tiempos de fabricación para la tecnología FFF.

Realizar una precisa estimación del tiempo de fabricación es una tarea capital en cualquier proceso productivo, ya que permite planificar de forma más efectiva la ejecución del proceso y predecir de forma más realista los costes de producción.

Esta predicción de tiempo es aún más importante en la tecnología FFF, puesto que el excesivo tiempo de fabricación es una de sus principales desventajas frente a otras tecnologías de procesado de polímeros como la inyección o el termoconformado. A pesar de su importancia no se han conseguido estimaciones eficaces, siendo de sobra conocidos los errores en las predicciones del tiempo de procesado que presentan los principales softwares de gestión de impresión como CURA, Slicer o Pronterface.

Hay tres enfoques que se han utilizado para intentar predecir el tiempo de fabricación: el analítico, el paramétrico y el experimental.

El enfoque analítico realiza un modelo a partir de la cinemática de la impresora. Los resultados de este enfoque son los mejores, pero requieren un conocimiento extenso de todos los elementos de la impresora y su construcción es muy compleja.

El enfoque paramétrico relaciona de forma simple el tiempo de fabricación con algunos de los parámetros del proceso, normalmente geométricos, como la altura de la pieza, la superficie de su contorno o su volumen. Son modelos sencillos de construir, pero muy poco precisos.

El enfoque experimental relaciona el tiempo de fabricación con los valores de una serie de parámetros tomados a partir de datos experimentales. Estos modelos son más eficientes que los paramétricos y más sencillos de construir que los analíticos, pero presentan el problema de que sólo son válidos para el modelo en el que se generan y en las condiciones ensayadas, por lo que tienen una baja reproducibilidad.

Lo que se plantea con este objetivo es desarrollar un modelo mixto de predicción de tiempos que combine los enfoques analítico y experimental. A partir de los datos experimentales obtenidos en el estudio del objetivo anterior, y la relación observada entre la velocidad real y las características de la trayectoria. Se pretende establecer una metodología de cálculo para obtener un modelo que permita predecir de forma precisa el tiempo de generación de una pieza completa con tecnología FFF, a partir de la geometría de la misma. La metodología de cálculo propuesta y el modelo de predicción deberán ser validados en distintas impresoras que usen la tecnología FFF imprimiendo piezas reales.

3. Identificar los parámetros de proceso críticos que optimizan la impresión de piezas con tecnología FFF en relación con su calidad superficial.

Las piezas fabricadas por FFF no siempre presentan la calidad superficial deseada comparada con la obtenida por otros procesos de fabricación aditiva como la fotopolimerización o la proyección de material, por lo que es habitual tener que usar técnicas de posprocesado tras su impresión. Uno de los efectos más acusados, y que es fácilmente identificable en piezas FFF, es el denominado efecto escalera, que afecta principalmente a la calidad superficial de las piezas en sus superficies no horizontales respecto al plano de generación.

Existen múltiples estudios que discuten el efecto que tienen los distintos parámetros de proceso de la tecnología FFF sobre aspectos como las propiedades mecánicas, la tolerancia geométrica o la calidad superficial de las piezas fabricadas. Estos estudios dejan de manifiesto que el resultado final de la pieza depende de los valores escogidos para cada parámetro de proceso, pero no se acaban de identificar cuáles son los parámetros críticos y cómo afecta cada uno de ellos a la pieza final, principalmente por la cantidad de parámetros que pueden influir en el proceso.

Se plantea como objetivo hacer un estudio que relacione la rugosidad que presentan las piezas fabricadas por FFF con los parámetros de impresión que según la literatura pueden ser a priori más influyentes: altura de capa, espesor de pared, velocidad de impresión, temperatura de extrusión y patrón de relleno. El estudio se centrará en identificar los parámetros críticos, de forma que su correcta elección permita optimizar el proceso FFF desde el punto de vista de la calidad del acabado superficial, minimizando uno de los principales inconvenientes de esta tecnología.

4. Estudiar la influencia de los parámetros geométricos y funcionales del proceso SPIF en el acabado de la pieza y en la fuerza de conformado, para láminas de polímeros.

Los procesos de deformación incremental suponen una solución para obtener de forma rápida y económica objetos tridimensionales a partir de chapas o láminas. Aunque estos procesos se están usando a nivel industrial en chapas metálicas, extender su uso a

láminas poliméricas es aún un desafío. El estudio de la deformación incremental en polímeros es más complejo que en metales debido al comportamiento elastoplástico de los mismos y a la gran influencia que tiene la temperatura en el mecanismo de deformación.

El proceso SPIF aplicado en polímeros puede presentar, comparado con su aplicación en metales, una pobre precisión dimensional y un deficiente acabado superficial, debido principalmente a la recuperación elástica y a la degradación del material por el aumento de temperatura en la zona de contacto entre el punzón y la lámina.

Se establece como cuarto objetivo estudiar la influencia que tienen los parámetros geométricos y de funcionamiento del proceso SPIF en la geometría y acabado de las piezas conformadas, y especialmente en la fuerza necesaria para la adecuada deformación de las láminas. Estudiar la fuerza de conformado puede ser una estrategia adecuada para avanzar en el conocimiento de los procesos de deformación incremental en polímeros, por su relación con los mecanismos de deformación y con la potencia consumida en el proceso.

Para realizar el estudio se plantea adaptar una fresadora CNC, fabricando el montaje necesario para ejecutar el proceso de SPIF. Se realizará un plan de ensayos experimentales con diferentes configuraciones del proceso variando los parámetros funcionales del mismo, como los materiales de las láminas y los punzones, la velocidad de avance y el sentido de giro del punzón, o la lubricación, con objeto de estudiar su influencia en la formabilidad de las piezas y en el acabado. También se pretende realizar otra serie de ensayos que determinen la influencia de los parámetros geométricos fundamentales del proceso, profundidad de deformación, ángulo de deformación y tamaño del punzón, en la fuerza de conformado.

5. Generar un modelo que permita predecir la fuerza de conformado del proceso SPIF para optimizar la configuración el proceso.

Como se ha indicado en el objetivo anterior, estudiar la fuerza de conformado tiene gran interés para entender los complejos mecanismos de deformación producidos, y permitir predecir roturas, geometrías resultantes y consumos energéticos, ayudando a optimizar el proceso.

Existen modelos numéricos y analíticos que simulan el proceso SPIF. La mayoría de los modelos numéricos usan el método de los elementos finitos y se han centrado en predicciones geométricas, no habiéndose desarrollado modelos de predicción de fuerzas que presenten una buena precisión con un tiempo de cálculo computacional razonable. Por otro lado, sí que existen algunos modelos analíticos que presentan buenos resultados en la predicción de fuerzas, pero aplicados principalmente a chapas metálicas, y no a chapas poliméricas.

Se pretende con este objetivo generar un modelo que permita predecir el comportamiento del proceso SPIF aplicado a chapas de distintos materiales poliméricos, con especial atención al comportamiento de la fuerza de conformado. Se partirá del

estudio experimental de la evolución de las fuerzas durante el proceso y su dependencia de los parámetros geométricos realizado en el objetivo anterior. A partir de los datos experimentales se generará un modelo numérico o analítico que pueda predecir las fuerzas que se van a producir durante la ejecución del proceso para alcanzar la geometría objetivo deseada. Este modelo deberá ser validado por ensayos experimentales que aseguren la concordancia entre la geometría resultante y la fuerza de conformado real, y las predicciones realizadas.

4. PUBLICACIONES

En este apartado se relacionan y resumen los artículos publicados en revistas científicas que han surgido como consecuencia del trabajo de investigación realizado para la consecución de los objetivos planteados en esta tesis doctoral.

El **primer objetivo** planteado (**Estudiar la influencia de la geometría de la trayectoria seguida por el extrusor en el tiempo de procesado en FDM**) se desarrolla en las siguientes dos publicaciones:

G. Medina-Sanchez, E. Torres-Jiménez, R. López-García & R. Dorado-Vicente (2017) *Cutting time in pocket machining for different tool-path approximation segments*. *Procedia Manufacturing*, 13, 59-66; DOI: doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.009

G. Medina-Sanchez, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jiménez & R. López-García (2019) *Build Time Estimation for Fused Filament Fabrication via Average Printing Speed*. *Materials*, 12, 3982; DOI: doi.org/10.3390/ma12233982

En el primer artículo se aborda el problema de establecer una relación entre el tiempo de fabricación real y la trayectoria recorrida por la herramienta de corte en una fresadora CNC.

Se realiza un diseño de experimentos para medir experimentalmente el tiempo real que tarda la fresadora en seguir una trayectoria diseñada, y con ello la velocidad de avance real. El diseño se realiza para tres factores con diferentes niveles: la longitud de segmento, el radio de curvatura de la trayectoria recorrida y el tipo de interpolación, lineal (G01) o circular (G02). Los resultados muestran que el avance real será muy diferente del avance programado que usualmente se utiliza para calcular los tiempos de fabricación. Los factores más influyentes serán el tipo de interpolación (G01 o G02) y la longitud de los intervalos, mientras que la curvatura sólo influye en segmentos de longitudes grandes. A partir de los resultados de los ensayos se establece un modelo experimental que permite calcular la velocidad de avance real en función de la longitud del intervalo y del tipo de interpolación. Un sencillo algoritmo permitirá predecir el tiempo de corte real a partir del modelo de velocidad obtenido experimentalmente y el análisis de la trayectoria. Para validar el modelo se realizan diversos ensayos con trayectorias aleatorias con diferentes longitudes de segmento y curvaturas. Los resultados consiguen un error medio en el tiempo de corte estimado del 10%, frente al error medio del 34% cuando el tiempo se estima a partir de la velocidad programada.

En el segundo artículo mencionado se traslada la idea estudiada en el artículo anterior a impresoras 3D con tecnología FFF donde, aunque las máquinas tienen una potencia y una dinámica diferente, la estrategia de movimiento y su codificación es semejante. El propósito final del artículo es establecer una metodología que permita estimar de forma

precisa el tiempo de fabricación de una pieza con FFF, que es el segundo objetivo planteado en esta tesis, pero como paso previo se hace necesario estudiar la influencia de la trayectoria programada en la velocidad de impresión de forma semejante a lo realizado en el artículo anterior.

Se llevan a cabo una serie de ensayos experimentales en los que se mide el tiempo que el extrusor tarda en recorrer unas trayectorias programadas y con ello se calcula la velocidad de impresión media. Las trayectorias se diseñan variando dos factores, la longitud del segmento de interpolación entre dos puntos consecutivos (s) y el ángulo de cambio de dirección entre dos segmentos consecutivos (α). Los resultados muestran que para trayectorias rectilíneas ($\alpha = 0^\circ$) la relación entre la velocidad de impresión y la longitud de intervalo evoluciona de una relación lineal, para intervalos pequeños, a una relación potencial que tiende a la velocidad máxima programada para intervalos suficientemente largos. Este comportamiento lineal-potencial se repite para trayectorias curvas ($\alpha > 0^\circ$), pero disminuyendo el tramo de comportamiento lineal conforme el ángulo de la trayectoria aumenta. Las tres impresoras FFF en las que se han realizado los ensayos, presentan unos resultados similares.

Los resultados de los ensayos muestran, al igual que pasaba en la fresadora CNC, que la velocidad de impresión real no alcanza la velocidad programada y que tiene una fuerte dependencia de los dos factores analizados, s y α . La diferencia entre velocidad real y programada será mayor cuanto menor sea el valor de s y mayor sea α , lo que se corresponde con trayectorias con intervalos pequeños y cambios de dirección acusados que provocan continuas aceleraciones y desaceleraciones del extrusor. Esto justifica los errores que se cometen al hacer las predicciones de tiempo de fabricación de forma grosera, dando por hecho que la velocidad de impresión real es constante en toda la trayectoria e igual a la velocidad programada.

El **segundo objetivo** que se pretende alcanzar (**Desarrollar un método de cálculo para realizar una estimación precisa de los tiempos de fabricación para la tecnología FDM**) se plantea en la segunda parte de la publicación anteriormente señalada:

G. Medina-Sanchez, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jiménez & R. López-García (2019) *Build Time Estimation for Fused Filament Fabrication via Average Printing Speed*. *Materials*, 12, 3982; DOI: doi.org/10.3390/ma12233982

Una vez alcanzado el primer objetivo, y demostrada la dependencia de la velocidad de impresión real de los parámetros s y α asociados a la trayectoria de la extrusora, lo que se plantea en este artículo es establecer una metodología que permita crear un modelo analítico-experimental que calcule de forma precisa el tiempo de impresión de una pieza tridimensional real. En el artículo se desarrolla una metodología que permite, con un número bastante limitado de ensayos, crear una superficie de respuesta de la velocidad de impresión real en función de los factores s y α .

Se plantean dos alternativas para generar la superficie de respuesta $v = f(s, \alpha)$. La primera alternativa se basa en la relación lineal y potencial de v con s para cada α , determinada experimentalmente. Se propone una superficie lineal-potencial (LP) que aproxima la curva según esa relación lineal y potencial cuyos parámetros se obtienen experimentalmente. La otra alternativa es crear la superficie de respuestas con un parche de Coons (CP), que es una superficie creada por una interpolación de cuatro curvas de contorno obtenidas como una spline a partir de datos experimentales. En el artículo se explica cómo crear las superficies y los ensayos necesarios para obtener los datos que permiten generarlas. Una vez construida la superficie se puede calcular la velocidad real promedio en cada intervalo v_j , simplemente leyendo el código ISO de la trayectoria y calculando para cada intervalo j los valores de s_j y α_j . Con la velocidad real de cada intervalo se podrá calcular el tiempo como la suma de los tiempos de todos los intervalos de la trayectoria de la pieza.

Para comprobar la eficacia de la superficie en cualquier región s - α , se realizan varios ensayos con trayectorias generadas de forma aleatoria, pero con unos valores de s y α prefijados contenidos en una misma región del espacio. Los resultados muestran que los errores cometidos en la estimación de tiempo son inferiores al 10% en todas las regiones, para las tres impresoras ensayadas.

Finalmente se valida la metodología propuesta realizando varios ensayos con piezas reales impresas. Se escogen piezas en las que se varían la geometría de la superficie de la pieza, la escala y el patrón de relleno para universalizar la validación. Los resultados muestran unos errores de predicción del tiempo de fabricación máximos del 8,5% para las tres impresoras, muy por debajo de las predicciones realizadas por el software Pronterface o por las calculadas de forma teórica a partir de la velocidad programada.

El **tercer objetivo** planteado (**Identificar los parámetros de proceso críticos que optimizan la impresión de piezas con tecnología FFF en relación con su calidad superficial**) se desarrolla en el siguiente artículo:

Perez, M., **G. Medina-Sanchez**, A. Garcia-Collado, M. Gupta & D. Carou (2018) *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters*. *Materials*, 11, 13. DOI: doi.org/10.3390/MA11081382

En este artículo se realiza un estudio experimental sobre la calidad superficial que presentan las piezas fabricadas por fabricación aditiva con la tecnología FFF. El objetivo del artículo es determinar cuáles de los parámetros de proceso son los que más afectan a la rugosidad que presentan las piezas fabricadas, y de qué manera afectan.

Se realiza inicialmente una revisión bibliográfica para acotar el problema, observando qué parámetros de proceso han sido analizados previamente por otros autores y los resultados que obtuvieron. A partir de estos datos se realiza un plan experimental donde

se escogen los cinco factores a analizar (altura de capa, espesor de pared, velocidad de impresión, temperatura y patrón de relleno) y los niveles que se van a combinar. Se imprimen piezas de geometría cilíndrica de PLA (Ácido Poliláctico) con las combinaciones de factores determinadas en el plan de experimentos, y se mide la rugosidad en seis puntos diferentes de la superficie lateral de cada una de las piezas.

Para identificar la influencia de los cinco factores analizados sobre la calidad superficial, se realiza un Análisis de Varianza (ANOVA) y un análisis estadístico no paramétrico usando los coeficientes de las correlaciones de Spearman ρ y Kendall τ , sobre los resultados de las mediciones.

El análisis arroja como resultado que los parámetros críticos son la altura de capa y el espesor de pared, no teniendo una influencia significativa la velocidad de impresión, la temperatura y el patrón de relleno. Se muestra en los resultados que los dos parámetros críticos tienen una gran influencia en la calidad superficial, siendo mayor la rugosidad de la pieza impresa al incrementar cada uno de ellos por separado o ambos de forma simultánea.

El **cuarto objetivo** de esta tesis (**Estudiar la influencia de los parámetros geométricos y funcionales del proceso SPIF en el acabado de la pieza y en la fuerza de conformado, para láminas de polímeros.**) se desarrolla en las dos publicaciones siguientes:

G. Medina-Sanchez, E. Torres-Jiménez, R. López-García, R. Dorado-Vicente & R. Cazalla-Moral (2017) *Temperature influence on Single Point Incremental Forming of PVC parts*. *Procedia Manufacturing*, 13, 335-342; DOI: doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.085

G. Medina-Sanchez, A. Garcia-Collado, D. Carou & R. Dorado-Vicente (2018) *Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets*. *Materials*, 11, 1997. DOI: doi.org/10.3390/ma11091597

En el primer artículo se describe el estudio experimental realizado al deformar una chapa de PVC mediante el proceso SPIF. El objetivo del estudio es determinar la influencia de la temperatura en el proceso y su relación con las fuerzas de conformado, la rugosidad superficial y la precisión dimensional. Para ello se realizarán los ensayos variando los parámetros de funcionamiento que en principio más pueden afectar al aumento de la temperatura durante el proceso: velocidad de giro del punzón, sentido de la rotación y material del punzón. La geometría objetivo a obtener será un tronco de cono cuyos parámetros geométricos permanecerán constantes: espesor de chapa, ángulo de inclinación del cono, profundidad de deformación y geometría del punzón. En el artículo se describe tanto el material utilizado como la metodología empleada en el estudio. Los resultados del estudio muestran cómo evolucionan la temperatura y las fuerzas de conformado durante el proceso en cada ensayo, y la geometría final obtenida y la rugosidad de la superficie deformada de cada pieza.

Los resultados muestran la gran influencia de la velocidad de giro y el material del punzón en la temperatura del proceso por efecto del rozamiento. El rozamiento provoca un aumento de la temperatura en la zona de contacto que disminuye las fuerzas de conformado, y en ocasiones degrada el material produciendo un mal acabado superficial y roturas. También se observa que la geometría obtenida se aleja de la geometría objetivo debido a la recuperación elástica del PVC.

El segundo artículo mencionado, tiene como objetivo principal establecer un modelo de predicción de las fuerzas de conformado, objetivo que se desarrolla en el siguiente punto. Pero como paso previo a la generación del modelo, se realiza un estudio experimental de la evolución de la fuerza durante el proceso en función de los parámetros geométricos del mismo. A partir de los resultados obtenidos del anterior artículo, se establecen unos parámetros funcionales constantes: velocidad de avance del punzón, materiales del punzón y de la lámina, y geometría objetivo. Para poder estudiar el proceso sin fricción se lubricará el punzón y se evitará su rotación, de este modo el incremento de temperatura será debido principalmente a la deformación. Los ensayos efectuados en este artículo se realizan usando como factores los parámetros geométricos fundamentales del proceso: el diámetro del punzón, el ángulo de deformación y la profundidad de deformación. Se obtiene como resultado de los ensayos diferentes curvas que muestran la evolución de la fuerza de conformado a lo largo del proceso. Estas curvas permitirán ajustar y validar los modelos de fuerzas que se proponen en el artículo.

El **quinto objetivo** de esta tesis (**Generar un modelo que permita predecir la fuerza de conformado del proceso SPIF para optimizar la configuración el proceso.**) se desarrolla en la publicación siguiente:

G. Medina-Sanchez, A. Garcia-Collado, D. Carou & R. Dorado-Vicente (2018) *Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets*. *Materials*, 11, 1997. DOI: doi.org/10.3390/ma11091597

Como se ha introducido en la sección anterior, el objetivo de este artículo es generar un modelo de predicción de las fuerzas de conformado para el proceso SPIF en láminas poliméricas.

En el artículo se proponen dos modelos, uno semianálítico y otro numérico. Para el modelo semianálítico se introduce un concepto novedoso al que se le denomina energía específica de conformado, que se define como el trabajo por unidad de volumen de material deformado. Esta energía será constante para un mismo material, conociendo su valor se puede calcular la fuerza de conformado a partir del volumen deformado y la profundidad de deformación. La energía específica de deformación se obtiene experimentalmente a partir del valor de la fuerza de conformado obtenida de los ensayos del objetivo anterior, y del cálculo del volumen deformado, tomando éste como el producto de las superficie de contacto entre la lámina y el punzón (Bansal et al. 2017),

y el espesor medio de lámina deformado. En el artículo se obtiene el modelo para láminas de PVC y PC, que es validado con nuevos ensayos experimentales obteniéndose un error de predicción menor del 3%.

El modelo numérico se realiza con un análisis dinámico de tensiones totalmente acopladas con el software Abaqus. El análisis se lleva a cabo considerando el efecto de la inercia, el comportamiento del material por efecto de la temperatura y la respuesta térmica transitoria. También se incluyen las ecuaciones de flujo de calor que modelan la disipación de la energía producida por plasticidad, que aumenta localmente la temperatura. Para la simulación numérica se usó un modelo de elementos finitos, tomando el punzón y la matriz como superficies rígidas, y discretizando la lámina de polímero. El contacto entre el punzón y la lámina se simula como una interacción superficie a superficie con penalización tangencial y contacto rígido en dirección normal. Para los dos polímeros se usa un modelo hiperelástico no lineal con endurecimiento isotrópico. El modelo se calibra a partir de los ensayos experimentales realizados y se valida con unos nuevos ensayos arrojando errores menores al 9% en la predicción de la fuerza. Del modelo numérico también se obtiene el valor del espesor de la pared deformada, con unos errores inferiores al 6%.

Se concluye que ambos modelos son efectivos para predecir las fuerzas de conformado y conocer el comportamiento del proceso SPIF a partir de los datos geométricos, teniendo el semianalítico menor carga de cálculo, y el numérico menor coste experimental.

5. CONCLUSIONES DE LA TESIS

La presente tesis doctoral contiene un conjunto de trabajos de investigación relacionados con dos tecnologías de prototipado rápido, FFF y SPIF, donde se aplican técnicas experimentales, metrológicas y de análisis estadístico, para mejorar su conocimiento y disponer de metodologías de trabajo y herramientas para optimizar su uso. Con el desarrollo de la presente tesis doctoral se ha generado conocimiento y se han realizado aportaciones relevantes en el ámbito del área de conocimiento de la ingeniería de los procesos de fabricación. Este conocimiento pretende extender el uso de las dos tecnologías estudiadas, en el ánimo de que en un futuro estas nuevas tecnologías puedan suponer una alternativa real a los procesos de fabricación tradicionales, y conduzcan a una fabricación más rápida y flexible, con mayor grado de automatización, y con mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental.

Para la tecnología FFF se ha evaluado la influencia de la trayectoria recorrida por el extrusor en la velocidad real del mismo. Se ha propuesto una metodología experimental para calcular la velocidad real y un algoritmo para la estimación del tiempo de fabricación. Estas herramientas permiten predecir con bastante precisión el tiempo de fabricación, lo que tiene gran utilidad para la optimización de la pieza en la fase de diseño, la optimización de la configuración del proceso en la fase de planificación del mismo, o la correcta planificación de los tiempos de fabricación en la fase de planificación de la producción.

El segundo aspecto que se ha evaluado para la tecnología FFF es la influencia de los parámetros de configuración del proceso en la calidad de la pieza fabricada. El estudio experimental realizado y el posterior análisis estadístico han permitido identificar los parámetros críticos del proceso. La calidad del acabado de las piezas, es uno de los mayores problemas que presenta esta tecnología, por lo que el conocimiento de los parámetros más influyentes conducirá a una mejor planificación del proceso de fabricación y una mejora del resultado final.

Para la tecnología SPIF se ha evaluado principalmente la evolución de las fuerzas de conformado para diferentes termoplásticos. Los ensayos realizados muestran la dependencia de las fuerzas de los parámetros del proceso, especialmente de la profundidad de paso, el diámetro del punzón y el ángulo de inclinación, y de la temperatura que se alcanza en la zona de deformación. Se han propuesto dos modelos, uno semianalítico y otro numérico, para estimar las fuerzas producidas en el proceso. La estimación de las fuerzas permite optimizar el proceso, lo que lleva a una fabricación más eficiente de las piezas.

Las principales conclusiones obtenidas en los trabajos de investigación publicados que componen esta tesis doctoral son las siguientes:

- La velocidad de avance real de la herramienta en el fresado en máquinas CNC no coincide con velocidad programada y no permanece constante, sino que varía con la longitud del segmento que se recorre y el tipo de interpolación programada. Se puede obtener la velocidad de avance real en función de la longitud de intervalo aplicando la metodología experimental presentada, y usarla para estimar de forma precisa el tiempo de mecanizado real aplicando el algoritmo de cálculo propuesto.
- De igual forma la velocidad de avance de las extrusoras en impresoras 3D de tecnología FFF, tampoco se corresponde con la velocidad programada. En este caso la velocidad de avance real dependerá de la trayectoria, y más concretamente de la longitud del segmento que se recorre y el ángulo entre segmentos consecutivos.
- En impresoras de tecnología FFF se puede calcular la velocidad real del extrusor mediante la realización de unos pocos ensayos experimentales de caracterización del comportamiento dinámico del extrusor. Se propone una metodología de cálculo para obtener una superficie de respuesta que aproxima la velocidad real para cada tramo en función de la geometría de la trayectoria recorrida. A partir de esta superficie de respuesta se puede predecir de forma muy precisa el tiempo de fabricación de una pieza. El algoritmo propuesto calcula el tiempo de fabricación con errores menores al 8,5%.
- La calidad de las piezas fabricadas por la tecnología FFF depende en gran medida de los parámetros de impresión seleccionados. Con los ensayos experimentales realizados y el análisis de varianza de los resultados, se ha corroborado que la altura de capa es un parámetro de impresión crítico, tal y como se podría esperar a tenor de la bibliografía consultada. Pero de igual manera se ha podido encontrar que el espesor de pared es otro parámetro crítico. Ambos parámetros afectan a la calidad superficial de las piezas fabricadas, aumentando la rugosidad al aumentar su valor, tanto de forma aislada como combinada.
- El estudio de las fuerzas de conformado en los procesos de deformación incremental monopunto es clave para la optimización del proceso. Los ensayos experimentales realizados muestran el comportamiento de las fuerzas de conformado durante el proceso SPIF y su dependencia de los parámetros de configuración del proceso. Las fuerzas de conformado presentan una etapa de incremento rápido al inicio del proceso de deformación y una etapa de estabilización posterior. La tipología final de la curva dependerá de las características mecánicas del material de la lámina deformada.
- Los ensayos realizados también ponen de manifiesto la influencia de la temperatura en el valor medio de las fuerzas de conformado medidas. El incremento de la temperatura disminuye la fuerza de conformado para láminas de PVC, pero puede producir defectos superficiales o roturas por degradación del material. La temperatura alcanzada dependerá principalmente del material y la velocidad de giro del punzón, y en menor medida del volumen de material deformado.

- Se propone un modelo semianalítico para la predicción de las fuerzas de conformado en procesos de conformado de láminas poliméricas mediante SPIF. Este modelo permite calcular la energía específica de conformado a partir de unos pocos ensayos experimentales. A partir de esta energía se puede calcular la fuerza necesaria para deformar un volumen determinado de material. El modelo propuesto se ha validado para láminas de PVC y PC obteniéndose unos errores de predicción menores del 3%.
- Se propone un modelo numérico para simular el proceso de conformado de láminas de material polimérico mediante elementos finitos. El modelo propuesto tiene en cuenta el comportamiento térmico del material. Este modelo permite predecir tanto el valor de las fuerzas de conformado como el de la geometría deformada resultante. El modelo numérico ha sido validado en láminas de PVC y PC, obteniéndose en este caso errores inferiores al 10%.

6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Al ser las dos tecnologías evaluadas dos tecnologías emergentes, aún hay bastantes campos en los que enfocar futuras líneas de investigación.

6.1 Fabricación aditiva mediante procesos de extrusión

Para la tecnología FFF, los campos de investigación en los que focalizar las futuras investigaciones, serían aquellos que buscan minimizar las principales limitaciones de esta tecnología: su aplicación a materiales no poliméricos o materiales compuestos, la mejora de la velocidad de impresión, y la mejora del acabado de las piezas imprimidas (Cano-Vicent et al. 2021).

Como continuación de los trabajos realizados en esta tesis se proponen las siguientes líneas de investigación para un futuro inmediato, habiéndose ya empezado a trabajar en algunas de ellas.

- *Generación de trayectorias suaves mediante la aproximación de las trayectorias con curvas B-spline.*

Las trayectorias generadas por los software laminadores se componen de segmentos rectos de diferente longitud y bruscos cambios de dirección, lo que limita la velocidad de avance del extrusor, tal y como se ha expuesto en este trabajo. La generación de trayectorias suavizadas permitiría optimizar la velocidad real alcanzada por el extrusor y disminuir el tiempo de impresión.

- *Mejorar el preprocesado geométrico de la pieza.*

Los softwares laminadores obtienen las trayectorias al cortar por planos horizontales las geometrías discretizadas de las piezas digitales. Esto provoca que en las zonas curvas de la pieza se genere una trayectoria con segmentos muy pequeños, lo que afecta a la velocidad de impresión, o en caso contrario, se realicen aproximaciones groseras al discretizar, lo que provoca errores de dimensionado final de la pieza. Se propone realizar el corte sobre la pieza digital antes de discretizarla, obteniendo un archivo STL personalizado con los cortes ya realizados. De esta forma se podría seleccionar las características de las trayectorias a seguir por el extrusor para minimizar su error o mejorar la velocidad de impresión.

- *Mejorar la detección del acabado superficial de las piezas fabricadas con FFF.*

Además de los parámetros de impresión, la geometría final de la pieza tiene gran influencia en el acabado superficial de la misma. Esto es especialmente acusado en piezas con superficies curvas o de gran inclinación, donde el efecto escalera es más acusado. Se propone estudiar la relación entre la calidad superficial de las zonas curvas o inclinadas de la pieza fabricada y su geometría. Poder predecir la calidad superficial resultante en función de la geometría o posicionamiento de la pieza puede mejorar el acabado de la misma sin la necesidad de aplicar técnicas de posprocesado.

- *Fabricación de estructuras complejas con materiales compuestos y componentes de densidad variable.*

Uno de los campos donde más se está investigando es el uso de nuevos materiales para la tecnología FFF. Se propone estudiar la generación de estructuras de geometría compleja o andamiajes que permitan a partir de la estrategia de generación de la propia estructura, variar su comportamiento o su densidad. De esta forma se podría fabricar elementos estructurales o piezas, que con una misma geometría final, puedan tener diferente comportamiento según la estrategia en la que se han depositado las capas o la cantidad de material depositado. Esto puede ser especialmente interesante para el uso de materiales poliméricos reforzados con fibras u otros materiales compuestos.

6.2 Procesos de deformación incremental

La tecnología SPIF no se ha desarrollado de igual manera para el conformado de chapas metálicas como para el de láminas de polímeros, donde está todavía en proceso de desarrollo. Entre los principales retos que tiene la tecnología SPIF aplicada a polímeros se encuentran el desarrollar un modelo de comportamiento preciso que prediga los mecanismos de fallo, mejorar el conocimiento del mecanismo de deformación producido o mejorar la aplicación de temperatura en el proceso para mejorar los resultados del mismo (Zhu et al. 2020).

Siguiendo los objetivos alcanzados en los trabajos de esta tesis se proponen como líneas futuras de actuación las siguientes:

- *Extender los modelos numérico y semianalítico propuestos a otros materiales poliméricos.*

Se aplicaría el modelo FEM a otros materiales poliméricos (PET, PP, PS, PLA, etc.) y se validaría con ensayos experimentales de igual forma que se ha realizado con el PVC y el PC. Se calcularía la energía específica de conformado aplicando el modelo semianalítico propuesto para otros materiales poliméricos.

- *Aplicación de técnicas de preprocesado.*

Se podría mejorar la formabilidad de las láminas y disminuir las fuerzas de conformado realizando marcas o cortes de poca profundidad en la lámina polimérica antes de su conformado. Se podría estudiar diferentes estrategias de corte (paralelas al contorno, formando una rejilla o concéntricas, por ejemplo) con el objetivo de disminuir la recuperación elástica y mejorar la precisión geométrica de las piezas finales sin debilitar la resistencia de las mismas.

- *Aplicación de calentamiento selectivo en las láminas.*

El aumento de temperatura de la lámina disminuye las fuerzas de conformado y mejora la formalidad. El reto está en aplicar a temperatura de forma selectiva en las zonas de deformación y controlar su valor para que no se debilite la lámina provocando la rotura.

- *Estudio energético comparativo de la tecnología SPIF.*

Una de las ventajas de la tecnología SPIF es su bajo coste, tanto de inversión como de ejecución. Se plantea realizar un estudio energético comparativo entre esta tecnología y procesos de conformado de láminas de polímeros tradicionales como el termoconformado, la embutición o la estampación.

7. REFERENCIAS

- Banerjee, S. S., S. Burbine, N. K. Shivaprakash & J. Mead (2019) 3D-Printable PP/SEBS Thermoplastic Elastomeric Blends: Preparation and Properties. *Polymers*, 11.
- Bansal, A., R. Lingam, S. K. Yadav & N. V. Reddy (2017) Prediction of forming forces in single point incremental forming. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 486-493.
- Barrios, J. M. & P. E. Romero (2019) Decision Tree Methods for Predicting Surface Roughness in Fused Deposition Modeling Parts. *Materials*, 12.
- Boparai, K. S., R. Singh & H. Singh (2016) Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 22, 281-299.
- Bourell, D., J. P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A. M. Beese & A. Clare (2017) Materials for additive manufacturing. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 66, 659-681.
- Cano-Vicent, A., M. M. Tambuwala, S. S. Hassan, D. Barh, A. A. A. Aljabali, M. Birkett, A. Arjunan & A. Serrano-Aroca (2021) Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, 47.
- Carter, P. W. & Ieee (2001) Advances in rapid prototyping and rapid manufacturing. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Proceedings*, 107-114.
- Dong, C. J. & Y. G. Lv (2016) Application of Collagen Scaffold in Tissue Engineering: Recent Advances and New Perspectives. *Polymers*, 8.
- Duflou, J. R., A. M. Habraken, J. Cao, R. Malhotra, M. Bambach, D. Adams, H. Vanhove, A. Mohammadi & J. Jeswiet (2018) Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*, 11, 743-773.
- Ghobakhloo, M. (2018) The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29, 910-936.
- Gibson, I., D. W. Rosen & B. Stucker (2010) Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 1-459.
- Haffner, M., A. Quinn, T. Y. Hsieh, E. B. Strong & T. Steele (2018) Optimization of 3D Print Material for the Recreation of Patient-Specific Temporal Bone Models. *Annals of Otolaryngology Rhinology and Laryngology*, 127, 338-343.
- Hagan, E. & J. Jeswiet (2003) A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 217, 213-225.
- Hernández Castellano, P. M. 2015. *Guía práctica de Rapid Manufacturing*. Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC.
- Huang, W., L. Schwan, V. Romero-Garcia, J. M. Genevaux & J. P. Groby (2019) 3D-printed sound absorbing metafluid inspired by cereal straws. *Scientific Reports*, 9.
- Hussain, G. & K. A. Al-Ghamdi (2014) PEO coating as lubrication means for SPIF of titanium sheet: characteristics and performance. *Materials Research Innovations*, 18, 727-733.
- Jeswiet, J. (2005) Asymmetric incremental sheet forming. *Sheet Metal 2005*, 6-8, 35-58.
- Jeswiet, J., E. Hagan & Sme (2002) Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of Sme, Vol Xxx, 2002*, 33-38.
- Jin, Y. Z., J. F. Zhang, Y. Wang & Z. C. Zhu (2009) Filament geometrical model and nozzle trajectory analysis in the fused deposition modeling process. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 10, 370-376.

- Li, Y. L., X. X. Chen, Z. B. Liu, J. Sun, F. Y. Li, J. F. Li & G. Q. Zhao (2017) A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2439-2462.
- Livesu, M., S. Ellero, J. Martinez, S. Lefebvre & M. Attene (2017) From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline. *Computer Graphics Forum*, 36, 537-564.
- Lu, B., H. Ou, S. Q. Shi, H. Long & J. Chen (2016) Titanium based cranial reconstruction using incremental sheet forming. *International Journal of Material Forming*, 9, 361-370.
- Maqbool, F. & M. Bambach (2017) Revealing the Dominant Forming Mechanism of Single Point Incremental Forming (SPIF) by Splitting Plastic Energy Dissipation. *17th International Conference on Sheet Metal (Shemet17)*, 183, 188-193.
- Martins, P. A. F., L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. E. Tekkaya & M. Kleiner (2009) Single point incremental forming of polymers. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 58, 229-232.
- Matsubara, M., S. Tanaka & T. Nakamura (1996) Development of incremental sheet metal forming system using elastic tools (Principle of forming process and formation of some fundamentally curved shapes). *Jsmc International Journal Series C-Dynamics Control Robotics Design and Manufacturing*, 39, 156-163.
- Melnikova, R., A. Ehrmann & K. Finsterbusch. 2014. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. In *Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM)*. Ningbo, PEOPLES R CHINA.
- Muir, M. & A. Haddud (2018) Additive manufacturing in the mechanical engineering and medical industries spare parts supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29, 372-397.
- Nafis, O. Z., M. Y. Nafriuzan, M. A. Munira, J. Kartina & Iop. 2011. Review on CNC-Rapid Prototyping. In *1st International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER)*. Kuantan, MALAYSIA.
- Noorani, R. (2018) 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. *3d Printing: Technology, Applications, and Selection*, 1-271.
- OECD. 2017. The next production revolution: implications for governments and business. Paris: OECD Publishing.
- Oropallo, W. & L. A. Piegl (2016) Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32, 135-148.
- Plaza, E. G., P. J. N. Lopez, M. A. C. Torija & J. M. C. Munoz (2019) Analysis of PLA Geometric Properties Processed by FFF Additive Manufacturing: Effects of Process Parameters and Plate-Extruder Precision Motion. *Polymers*, 11.
- Qiu, X. L., Y. R. Zhou, Z. Q. Guo & J. H. Zhang. 2016. The Application Trends of Rapid Prototyping Manufacturing. In *International Conference on Mechatronic, Manufacturing and Materials Engineering (MMME)*. Hong Kong, PEOPLES R CHINA.
- Redaelli, D. F., V. Abbate, F. A. Storm, A. Ronca, A. Sorrentino, C. De Capitani, E. Biffi, L. Ambrosio, G. Colombo & P. Frascini (2020) 3D printing orthopedic scoliosis braces: a test comparing FDM with thermoforming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 1707-1720.
- Romero, P. E., J. Arribas-Barríos, O. Rodríguez-Alabanda, R. González-Merino & G. Guerrero-Vaca (2021) Manufacture of polyurethane foam parts for automotive industry using FDM 3D printed molds. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 396-404.
- Schniederjans, D. G. (2017) Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. *International Journal of Production Economics*, 183, 287-298.
- Shewbridge, R., Hurst, A. and Kane, S. K. 2014. *Everyday making: identifying future uses for 3D printing in the home*. Vancouver: Proceedings of the 2014 conference on Designing interactive systems.
- Snyder, T. J., M. Andrews, M. Weislogel, P. Moeck, J. Stone-Sundberg, D. Birkes, M. P. Hoffert, A. Lindeman, J. Morrill, O. Fercak, S. Friedman, J. Gunderson, A. Ha, J. McCollister, Y. K.

- Chen, J. Geile, A. Wollman, B. Attari, N. Botnen, V. Vuppuluri, J. Shim, W. Kaminsky, D. Adams & J. Graft (2014) 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. *3d Printing and Additive Manufacturing*, 1, 169-176.
- Thomas, P. A., P. K. Aahlada, N. S. Kiran & J. Ivvala (2018) A Review On Transition In The Manufacturing Of Mechanical Components From Conventional Techniques To Rapid Casting Using Rapid Prototyping. *Materials Today-Proceedings*, 5, 11990-12002.
- Thompson, M. K., G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja & F. Martina (2016) Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 65, 737-760.
- Wickramasinghe, S., T. Do & P. Tran (2020) FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. *Polymers*, 12.
- Zhu, H., H. A. Ou & A. Popov (2020) Incremental sheet forming of thermoplastics: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 565-587.
- Zivanovic, S. T., M. D. Popovic, N. M. Vorkapic, M. D. Pjevic & N. R. Slavkovic (2020) An Overview of Rapid Prototyping Technologies using Subtractive, Additive and Formative Processes. *Fme Transactions*, 48, 246-253.

PARTE 2: COMPENDIO DE PUBLICACIONES

1. **G. Medina-Sanchez**, E. Torres-Jiménez, R. López-García & R. Dorado-Vicente (2017) *Cutting time in pocket machining for different tool-path approximation segments*. *Procedia Manufacturing*, 13, 59-66.
DOI: <https://doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.009>
2. **G. Medina-Sanchez**, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jiménez & R. López-García (2019) *Build Time Estimation for Fused Filament Fabrication via Average Printing Speed*. *Materials*, 12, 3982.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12233982>
3. Perez, M., **G. Medina-Sanchez**, A. Garcia-Collado, M. Gupta & D. Carou (2018) *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters*. *Materials*, 11, 13.
DOI: <https://doi.org/10.3390/MA11081382>
4. **G. Medina-Sanchez**, E. Torres-Jiménez, R. López-García, R. Dorado-Vicente & R. Cazalla-Moral (2017) *Temperature influence on Single Point Incremental Forming of PVC parts*. *Procedia Manufacturing*, 13, 335-342.
DOI: <https://doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.085>
5. **G. Medina-Sanchez**, A. Garcia-Collado, D. Carou & R. Dorado-Vicente (2018) *Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets*. *Materials*, 11, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11091597>

Referencia:

G. Medina-Sanchez, E. Torres-Jiménez, R. López-García & R. Dorado-Vicente (2017) *Cutting time in pocket machining for different tool-path approximation segments*. *Procedia Manufacturing*, 13, 59-66.

DOI:

<https://doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.009>

ABSTRACT:

Despite of the importance of cutting time in pocket machining for manufacturing cost prediction and process planning, its estimation is usually neglected and conducted dividing the total tool path length by the programmed feed rate. Nevertheless, driving the tool with a constant feed rate is, in general, not possible. We study the cutting time dependency with the tool-path curvature, type of interpolation (linear G01 or circular G02) and the distance between interpolation points (segment length). The study, conducted in two different milling machines, shows how shorter segments increase the actual cutting time, which is lower for G01 than for G02. According to the experimental results, we define a piecewise equation that estimates the real cutting time respect to the segment length and type (G1 or G2).

Keywords: G-code; feed rate; experimental tests; cutting time

Referencia:

G. Medina-Sanchez, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jiménez & R. López-García (2019) Build Time Estimation for Fused Filament Fabrication via Average Printing Speed. *Materials*, 12, 3982.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma12233982>

ABSTRACT:

Build time is a key issue in additive manufacturing, but even nowadays, its accurate estimation is challenging. This work proposes a build time estimation method for fused filament fabrication (FFF) based on an average printing speed model. It captures the printer kinematics by fitting printing speed measurements for different interpolation segment lengths and changes of direction along the printing path. Unlike analytical approaches, printer users do not need to know the printer kinematics parameters such as maximum speed and acceleration or how the printer movement is programmed to obtain an accurate estimation. To build the proposed model, few measurements are needed. Two approaches are proposed: a fitting procedure via linear and power approximations, and a Coons patch. The procedure was applied to three desktop FFF printers, and different infill patterns and part shapes were tested. The proposed method provides a robust and accurate estimation with a maximum relative error below 8.5%.

Keywords: 3D printing; rapid prototyping; efficiency; printing time; experimental model

Referencia:

Perez, M., **G. Medina-Sanchez**, A. Garcia-Collado, M. Gupta & D. Carou (2018) *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters*. *Materials*, 11, 13.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/MA11081382>

ABSTRACT:

The present paper shows an experimental study on additive manufacturing for obtaining samples of polylactic acid (PLA). The process used for manufacturing these samples was fused deposition modeling (FDM). Little attention to the surface quality obtained in additive manufacturing processes has been paid by the research community. So, this paper aims at filling this gap. The goal of the study is the recognition of critical factors in FDM processes for reducing surface roughness.

Two different types of experiments were carried out to analyze five printing parameters. The results were analyzed by means of Analysis of Variance, graphical methods, and non-parametric tests using Spearman's r and Kendall's τ correlation coefficients. The results showed how layer height and wall thickness are the most important factors for controlling surface roughness, while printing path, printing speed, and temperature showed no clear influence on surface roughness.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; ANOVA; correlation coefficients; fused deposition modeling; non-parametric tests; surface roughness

Referencia:

G. Medina-Sanchez, E. Torres-Jiménez, R. López-García, R. Dorado-Vicente & R. Cazalla-Moral (2017) *Temperature influence on Single Point Incremental Forming of PVC parts*. *Procedia Manufacturing*, 13, 335-342.

DOI:

<https://doi.org/10.11016/j.promfg.2017.09.085>

ABSTRACT:

Incremental sheet forming techniques, such as Single Point Incremental Forming (SPIF), have an appealing potential in rapid prototyping and processing low volume plastic sheet products. Fitting a conventional CNC milling machine to accomplish SPIF is easy and cheap: just design and assembly a rigid frame and manufacture a semi-spherical end punch. Nevertheless, polymeric SPIF parts have a lack of dimensional accuracy and surface quality because of springback and friction effects. This experimental work shows the influence of temperature and force on final dimension and surface finishing of PVC SPIF specimens. In order to produce a temperature and force variation, the following parameters are modified: punch material, spindle rotational speed and sense.

Keywords: Incremental forming; Dimensional accuracy; Roughness

Referencia:

G. Medina-Sanchez, A. Garcia-Collado, D. Carou & R. Dorado-Vicente (2018) *Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets*. *Materials*, 11, 1997.

DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma11091597>

ABSTRACT:

Incremental sheet forming (ISF) is gaining attention as a low cost prototyping and small batch production solution to obtain 3D components. In ISF, the forming force is key to define an adequate setup, avoiding damage and reducing wear, as well as to determine the energy consumption and the final shape of the part. Although there are several analytical, experimental and numerical approaches to estimate the axial forming force for metal sheets, further efforts must be done to extend the study to polymers. This work presents two procedures for predicting axial force in Single Point Incremental Forming (SPIF) of polymer sheets. Particularly, a numerical model based on the Finite Element Model (FEM), which considers a hyperelastic-plastic constitutive equation, and a simple semi-analytical model that extends the known specific energy concept used in machining. A set of experimental tests was used to validate the numerical model, and to determine the specific energy for two polymer sheets of polycarbonate (PC) and polyvinyl chloride (PVC). The approaches provide results in good agreement with additional real examples. Moreover, the numerical model is useful for accurately predicting temperature and thickness.

Keywords: incremental forming; FEM; force prediction; numerical model; semi-analytical model; specific energy.