



Proyecto Fin de Carrera

Implementación en MATLAB de algoritmos de
rellenado para proceso de impresión 3D basado en
gotas

Autor

Javier Sobreviela Obispo

Directora

Jelena Prša

Ponente

Roberto José Casas Nebra

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

Implementación en MATLAB de algoritmos de relleno para proceso de impresión 3D basado en gotas

RESUMEN

Durante la realización de este proyecto se han llevado a cabo las siguientes tareas. Una investigación sobre el estado del arte de la tecnología de impresión 3D, en especial sobre una de las fases del proceso que comparten este tipo de tecnologías. Este proceso parte de un diseño por ordenador de un objeto y tras procesarlo produce una copia física de ese objeto.

Para ello se requiere de un tratamiento de los datos CAD que conforman el objeto en ordenador y la generación de las instrucciones que la impresora 3D necesita para producir el objeto físico. Esta fase consiste en trazar una estrategia de relleno del interior de la pieza que previamente ha sido dividida en capas. El objetivo del proyecto es mejorar los resultados de esta fase.

Tras analizar las tecnologías de impresión 3D más comunes, se continuó con un estudio profundo de las diferentes estrategias disponibles en la actualidad en la industria o el campo de la investigación. Paralelo a este estudio se llevó a cabo un análisis de las deficiencias y limitaciones que dichas estrategias. Con este análisis se produjo una clasificación de los tipos de limitaciones que podían aparecer en las diferentes estrategias estudiadas.

El siguiente paso de la investigación se extendió a otros campos en la búsqueda de soluciones para la detección de vacíos en el sentido geométrico. Se encontraron dos ideas que fueron implementadas. Se escogió el más rápido de estos métodos para la implementación final. Tomando un fichero de una pieza rellenada con una estrategia de las analizadas previamente que presenta huecos, el programa desarrollado es capaz de detectar esos huecos y rellenarlos produciendo un nuevo fichero con el relleno mejorado.

Para probar el programa desarrollado se ejecutaron una serie de experimentos con varias series de piezas impresas, con y sin el programa desarrollado. Un test de software analizó que el relleno fuera correcto. Un análisis bajo microscopio midió un descenso en el tamaño de los vacíos en la superficie de la pieza. Un test de rugosidad midió un descenso en la rugosidad en la capa superior. Finalmente un ensayo de flexión dio un aumento de la tensión de rotura en las piezas con relleno mejorado.

Índice general

Índice general	3
I Memoria	6
1. Introducción	7
1.1. Contexto del Proyecto	7
1.2. Objetivos y Alcance del Proyecto	8
1.3. Desarrollo del proyecto	8
1.4. Contenido adicional	9
2. Impresión 3D	10
2.1. Tecnologías de Impresión 3D	10
2.2. Impresión 3D por gotas	12
2.3. Proceso general	13
3. Estrategias de Rellenado y Limitaciones	15
3.1. Rellenado por mallado	15
3.2. Rellenado por contornos	17
3.3. Rellenado denso	18
4. Desarrollo del Algoritmo	20
4.1. Rellenado de Vacíos	20
4.2. Descripción del Proceso	21
4.3. Características Distintivas	22
5. Experimentos	24
5.1. Test en MATLAB	24
5.2. Series Impresas	24
5.3. Análisis con Microscopio	25
5.4. Medición de la Rugosidad	26
5.5. Ensayo de Flexión	26

6. Resultados de los Experimentos	27
6.1. Test en MATLAB	27
6.2. Análisis con Microscopio	27
6.3. Medición de la Rugosidad	29
6.4. Ensayo de Flexión	29
7. Conclusiones	31
Índice de figuras	33
Índice de cuadros	35
Bibliografía	36
II Anexos	40
A. Versión original del proyecto en inglés	41
B. Concepto de Solapamiento	135
C. Diagramas de Voronoi	136
D. Ejemplo de Ejecución	137
D.1. Generación del Diagrama de Voronoi	138
D.2. Rellenado del Vacío	139
D.3. Comparativa de Aproximaciones	140
D.4. Vecinos más cercanos	141
D.5. Ejemplos de relleno	142
D.6. Efecto de solapamiento	143
E. Ejemplo de G-Code	144
F. Diagramas de proceso	146
F.1. Parser	146
F.2. Analizador	147
F.3. Rellenado de vacíos	148
G. Configuración de los experimentos	149
G.1. Modelos Simulados	150
G.2. Microscopios y medición	151
G.3. Rugosímetro	153
G.4. Ensayo de flexión	154
H. Tabla T de Student	156

I. Resultados de los experimentos	158
I.1. Tablas test MATLAB	159
I.2. Tabla de medidas de rugosidad	161
I.3. Tabla de ensayo de flexión	162

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Introducción

El campo del prototipado rápido (del inglés Rapid Prototyping) es un ámbito relativamente joven en las tecnologías de fabricación, apareciendo la primera implementación de estereolitografía en 1986 [US-4575330]. Dentro de este campo se han propuesto diversas subdivisiones para agrupar las diferentes tecnologías que lo componen pero usualmente se suele considerar la fabricación aditiva (Additive Manufacturing) como el mayor representante de las tecnologías de prototipado rápido [1]. Como el propio nombre indica el funcionamiento básico de estas tecnologías consiste en añadir material para la construcción de un objeto.

Las aplicaciones de estas tecnologías son variadas a lo largo de la industria. Como por ejemplo en el campo de la aeronáutica [2, 3, 4], la fabricación de automóviles [5] o prótesis médicas [6, 7, 8].

Es dentro de este grupo de tecnologías donde se encuentra lo que se conoce como impresión 3D. A su vez este concepto incluye diversas implementaciones y tecnologías que trabajan con diferentes materiales y procesos. Un estudio de estas tecnologías se presenta en la sección 2.

Estas tecnologías comparten un proceso general de funcionamiento. Toda ejecución de impresión 3D parte de un modelo desarrollado en ordenador mediante herramientas CAD. Este modelo será tratado mediante software para analizarlo y prepararlo para que la maquina ejecute las órdenes y movimientos necesarios para la obtención del modelo físico previamente diseñado. Un símil de este proceso puede encontrarse en las máquinas CNC (control numérico por ordenador). Nuevamente en la sección 2.3 se presenta un análisis más profundo de este proceso. Este proyecto se enmarca en el campo de estas tecnologías de impresión 3D, específicamente las que trabajan con plástico fundido. El foco del proyecto se encuentra en la fase de tratamiento de software previo a la fabricación.

1.1. Contexto del Proyecto

Este proyecto se ha realizado en el marco del programa de intercambio Erasmus en la Technische Universität München (TUM, universidad técnica de Múnich). Dentro del Institute of Micro Technology and Medical Device Technology (MIMED), en el cual,

uno de los campos de investigación que tratan es el de prototipado rápido enfocado a aplicaciones médicas como aparatos de cirugía, prótesis o modelos de ensayo para operaciones.

En el departamento se encuentran todas las instalaciones que han sido necesarias para realizar el proyecto. Incluida la tecnología específica de impresión 3D a la que se enfoca este proyecto. En esta tecnología está basado el trabajo previo de investigación realizado en el departamento y sobre el que se apoya este proyecto. En especial la tesis doctoral de J.Schwaiger [9], en la que se presenta especialmente el software necesario.

El proyecto se ha realizado como proyecto fin de carrera para mis estudios de ingeniería industrial con especialización en automatización industrial y robótica.

La versión en inglés presentada en la TUM se adjunta en el anexo A.

1.2. Objetivos y Alcance del Proyecto

El objetivo del proyecto es la mejora de una fase del tratamiento de software del modelo CAD previo a la impresión. La tecnología específica de aplicación es la impresión por deposición de gotas de plástico fundido. Esta tecnología es similar al modelado por deposición fundida con la particularidad de que, en vez de un filamento continuo, se depositan gotas independientes. Esta diferencia obliga a la búsqueda de una aproximación diferente, pero que no saca del enfoque a las otras tecnologías. Ambas tecnologías y su funcionamiento se definen en el capítulo 2.

La fase en cuestión, presente en el proceso general mencionado previamente, consiste en desarrollar la información necesaria para llenar el interior del modelo durante la fase de impresión. Esta información se compone de las órdenes que ejecuta la impresora para fabricar la pieza. Actualmente esta fase se lleva a cabo mediante diversas estrategias que presentan limitaciones. El objetivo final del proyecto es desarrollar un algoritmo que supere esas limitaciones. Estas estrategias y limitaciones se explican en el capítulo 3, lo que supone el trabajo de investigación previo al desarrollo del algoritmo.

1.3. Desarrollo del proyecto

El desarrollo del algoritmo para satisfacer el objetivo propuesto vino precedido por un análisis de la investigación previa en el campo de la impresión 3D, específicamente de las fases de software involucradas en el proceso. Esta investigación facilitó una amplia visión de las diferentes estrategias que previamente habían sido utilizadas para ejecutar la fase de llenado y con ello las limitaciones observadas por los respectivos autores, además de las detectadas en diferentes resultados de impresión.

Con esta investigación se posibilitó una caracterización de los diferentes defectos que pueden aparecer. Con esta definición el objetivo se ajustó a la supresión de dichos defectos.

Una vez obtenido este objetivo concreto, se continuó la investigación, esta vez enfocada a dicha supresión. Esta última fase de la investigación produjo una serie de ideas que serían finalmente implementadas en un entorno de MATLAB. En este entorno se

desarrolla finalmente el algoritmo y se realiza un testeo previo a través de una herramienta de simulación de resultados de impresión desarrollada específicamente para este caso. El desarrollo del algoritmo y las ideas empleadas se presentan en el capítulo 4.

Para la comprobación del correcto funcionamiento del algoritmo, se aplicó a una serie de piezas para ser impresas mediante una impresora 3D basada en gotas, junto con una serie sin el algoritmo aplicado. Estas piezas impresas se sometieron a una serie de experimentos tras los cuales se comparan los resultados de ambas series. Los experimentos y la valoración de los resultados se presentan en los capítulos 5 y 6 respectivamente.

1.4. Contenido adicional

A parte de las secciones previamente mencionadas se incluye una sección de conclusiones en la que se presenta un resumen y valoración del conjunto del trabajo realizado, así como incidencias durante el desarrollo y propuestas de continuación del desarrollo.

En los anexos, además de la versión en inglés del proyecto, se incluyen también todas las tablas con resultados numéricos de los experimentos, así como más imágenes tomadas durante los experimentos y ejecuciones de simulación de resultados con MATLAB.

Capítulo 2

Impresión 3D

En esta sección se presenta un análisis de las tecnologías más comunes en el ámbito de la impresión 3D, así como la tecnología específica que se ha utilizado en este proyecto. Por último se presenta la descripción del proceso general de funcionamiento de este tipo de tecnologías, especialmente en el apartado de software.

2.1. Tecnologías de Impresión 3D

El concepto de impresión 3D incluye diversas implementaciones y tecnologías que trabajan con diferentes materiales y procesos. Como se menciona en la introducción, el funcionamiento básico de estos procesos consiste en añadir material capa a capa construyendo así un modelo determinado.

Algunas de estas tecnologías son:

Estereolitografía: curado de resinas fotopoliméricas mediante laser ultravioleta. Proceso capa a capa desde una plataforma que se desplaza dentro de un tanque lleno de dicha resina en estado líquido. En la figura 2.1 Se presenta un esquema del funcionamiento.

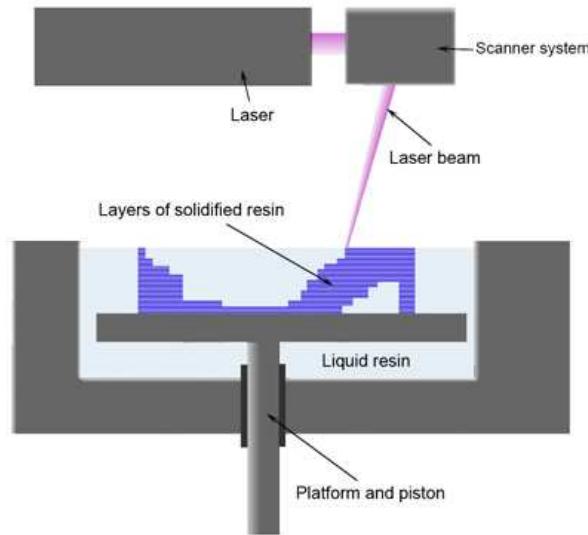


Figura 2.1: Estereolitografía, [10]

Sinterizado selectivo por láser: sinterizado de material en forma de polvo. Dicho material se encuentra depositado en una plataforma que, capa a capa, desciende mientras nuevo material en polvo ocupa el lugar y es a su vez sinterizado. Esta tecnología permite el uso de diversos materiales como pueden ser metales, cerámicas o plásticos. En la figura 2.2 Se presenta un esquema general de este tipo de tecnologías.

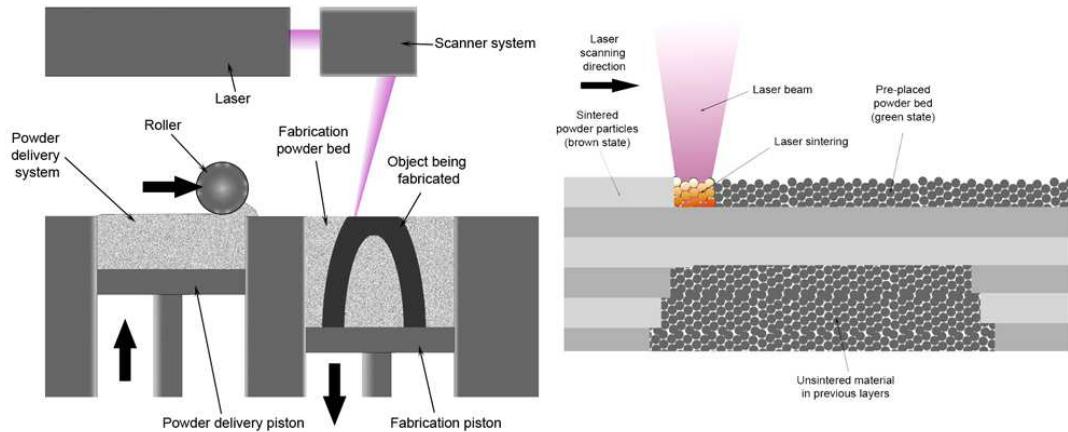


Figura 2.2: Sinterizado selectivo por láser, [11]

Modelado por deposición fundida: extrusión de polímero fundido, usualmente en

forma de filamento, sobre una plataforma. Para la construcción del modelo, debe existir la posibilidad de movimiento relativo tridimensional entre la cabeza extrusora y la plataforma. En la figura 2.3 Se presenta un esquema conceptual de este tipo de máquinas.

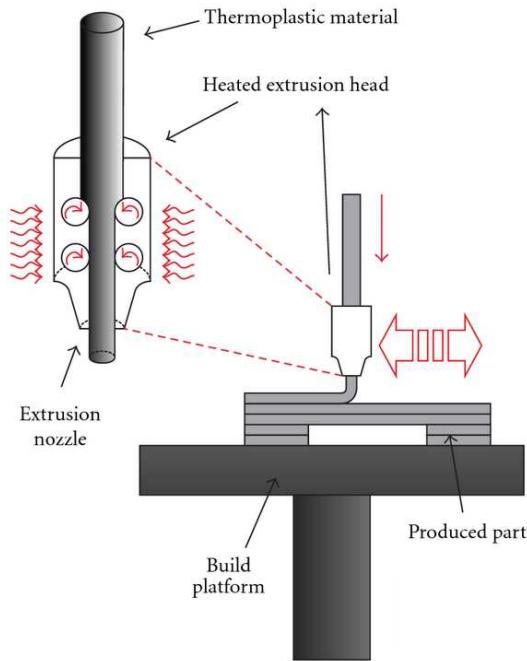


Figura 2.3: Modelado por deposición fundida, [12]

Este tipo de dispositivos tienen un valor monetario relativamente algo, desde pocos cientos de miles de dólares hasta el millón de dólares [1, 2014]. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología ha dado lugar a la aparición de máquinas más asequibles, especialmente para desarrollo a pequeña escala o para el campo de la educación. Un ejemplo de esto puede ser la MakerBot Replicator Mini con un coste de 1375\$ [13, 2014].

En la versión en inglés del proyecto (anexo A) se presenta un estudio más extenso de estas tecnologías.

2.2. Impresión 3D por gotas

La motivación inicial del proyecto era mejorar la fase de relleno para la tecnología de impresión por gotas. Se podría comparar con la tecnología de deposición fundida pero en este caso, en vez de filamento continuo, lo que se deposita son gotas independientes

de material plástico. Esta característica hace necesaria una aproximación diferente en cuanto al tratamiento de software necesario para preparar el modelo para su impresión.

El concepto de funcionamiento se presenta en la figura 2.4. Este consiste en una cabeza fija con boquilla que deposita gotas en una plataforma que se mueve en las 3 direcciones. Nuevamente, las gotas forman las capas en las que se ha dividido el modelo. Cada vez que se completa una capa la plataforma se desplaza y comienza la deposición de la siguiente capa.

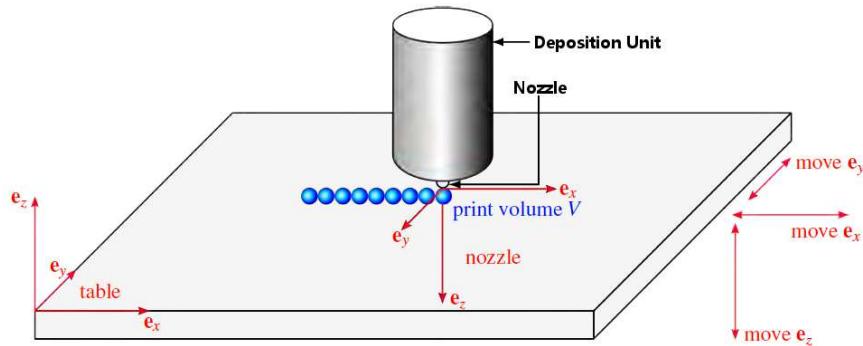


Figura 2.4: Impresora por gotas, [14]

Esta tecnología se encuentra actualmente patentada [Hehl, 2010].

2.3. Proceso general

La gran mayoría de tecnologías de impresión 3D comparten un proceso general común. Este proceso está formado por diferentes etapas que van desde la concepción de un modelo por ordenador hasta la obtención del prototipo físico de ese modelo. En la literatura especializada se proponen una variedad de secuencias [1, 15, 16]. Generalmente estas fases son:

1. Diseño en CAD
2. Conversión a formato STL
3. Verificación y corrección del fichero STL
4. División en capas del modelo
5. Rellenado de las capas y generación del fichero G-Code
6. Envío del fichero G-Code a la impresora

Durante el diseño del modelo en el programa CAD elegido se deben tener en cuenta las limitaciones que la tecnología de impresión escogida pueda presentar [17]. Un diseño

del modelo con estas consideraciones permitirá un mejor resultado y evitará defectos y dificultades en el proceso.

Una vez diseñado el modelo este debe ser exportado a STL. Este formato se ha convertido en el estándar de facto de la industria [18]. Este formato se basa en una triangulación de la superficie del modelo. Esto implica una aproximación a la forma real del modelo pero permite las siguientes y necesarias manipulaciones.

En la industria se ha detectado una cantidad significativa de ficheros STL imperfectos o corruptos [1]. Esto ha dado lugar a la necesidad de software específico para reparar estos ficheros previamente a realizar las siguientes fases del proceso.

Dado que estas tecnologías funcionan capa a capa como se ha mencionado previamente, el modelo se divide en capas de manera vertical. Estas capas son usualmente del mismo grosor aunque hay tecnologías que permiten un grosor variable. Una vez se ha dividido el modelo STL en capas, dando como resultado capas con un grosor determinado y formadas únicamente por los contornos de la pieza, la siguiente fase es llenar esas capas mediante alguna de las estrategias disponibles. El uso y limitaciones de estas estrategias de llenado de capas es el núcleo de este proyecto. En el siguiente capítulo se presentan las diferentes estrategias disponibles junto con un análisis de sus limitaciones.

Tras llenar las capas se genera un fichero en formato GCO (G-Code), el cual la impresora es capaz de comprender y que contiene todas las órdenes que la impresora tiene que ejecutar para fabricar el objeto. Tras la fabricación, en algunos casos, es necesario un tratamiento mecánico para limpiar la pieza y dejarla lista para su uso.

Capítulo 3

Estrategias de Rellenado y Limitaciones

Este capítulo se centra en analizar las diferentes estrategias disponibles para la fase de relleno de capas presentada en el anterior capítulo. Estas estrategias presentan limitaciones que serán a su vez descritas junto a cada estrategia.

Actualmente se dispone de 3 estrategias para llenar las capas, una de ellas específica para la tecnología de impresión por gotas. Estas estrategias son: relleno por mallado, relleno con contornos y relleno denso. Ejemplos de estos rellenos para la impresora de gotas pueden encontrarse en el anexo D.5.

Estas estrategias no son perfectas en cuanto al relleno total de cada capa y pueden producir vacíos sin material. Esta es la limitación que este proyecto busca superar.

3.1. Rellenado por mallado

En inglés “raster” o “hatching”, esta estrategia se presenta en la figura 3.1. También se le denomina relleno en zigzag [19, 20]. Consiste en un movimiento hacia adelante y hacia atrás siguiendo una serie de líneas paralelas y depositando el material sobre estas líneas. El relleno no solo incluye el mallado sino también al menos un contorno a lo largo del perímetro para asegurar la geometría de la pieza.

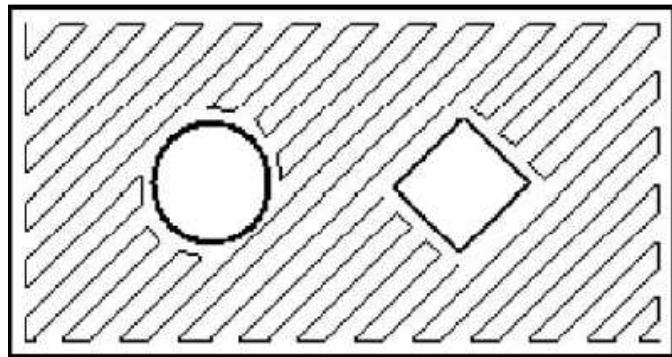


Figura 3.1: Rellenado por mallado, [21]

Esta es una de las estrategias más tratadas en la literatura [22, 23, 24, 25, 26] y esto ha llevado a un relativo consenso sobre los parámetros de esta estrategia. Estos parámetros son configurados por el usuario para adaptar el relleno a sus necesidades:

- **Ancho de camino/filamento:** representa el grosor del filamento depositado. A mayor grosor menor será el tiempo de fabricación y mayor la rigidez. Por el contrario un grosor elevado dificulta la deposición precisa de geometrías complejas, reduciendo la exactitud geométrica.
- **Ángulo de la malla:** el ángulo relativo entre capas de malla consecutivas puede ser configurado, generalmente se recomienda un valor de 90 grados [23].
- **Intervalo vacío:** representa el espacio entre filamentos/caminos. Si no se necesita un relleno muy denso puede elegirse un valor relativamente elevado para acelerar el proceso de fabricación. La desventaja de un relleno poco denso es una pérdida de capacidades mecánicas.

El uso de esta estrategia puede provocar la aparición de espacios no rellenados en la capa. Determinadas geometrías, combinadas con un ángulo no óptimo de la malla provocan vacíos en áreas cercanas al contorno de la pieza, la figura 3.2 lo ejemplifica.

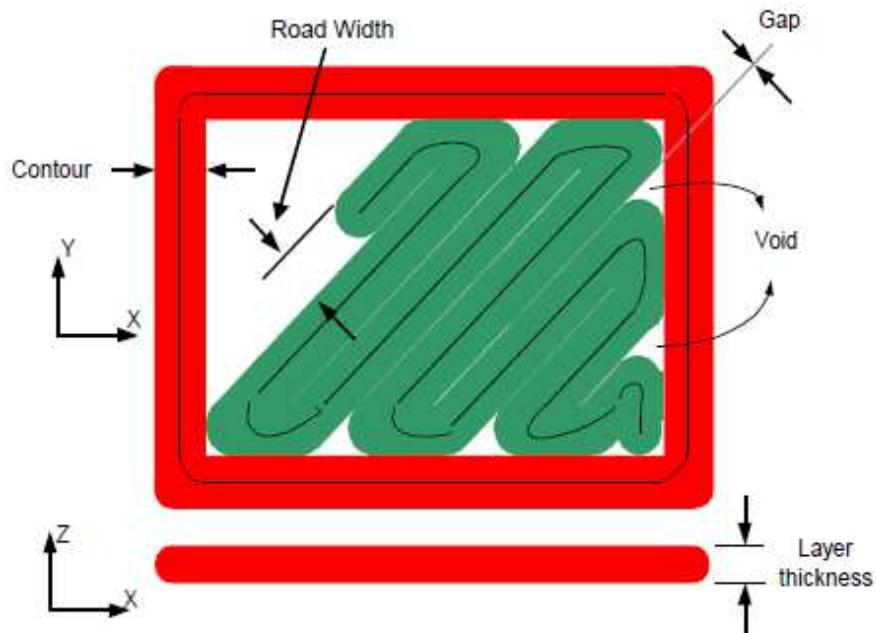


Figura 3.2: Vacíos generados, [27]

3.2. Rellenado por contornos

El resultado de la división en capas del modelo STL, fase presentada en el anterior capítulo, son los contornos horizontales del modelo en cuestión. Esta estrategia de relleno consiste en tomar estos contornos y desplazarlos hacia el interior de la pieza de manera repetida hasta que la capa queda completa. Este concepto puede observarse en la figura 3.3.

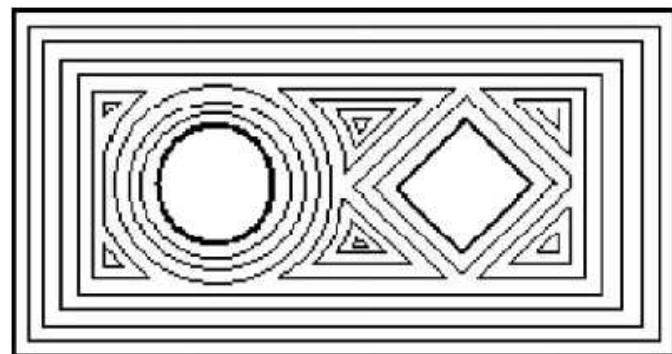


Figura 3.3: Rellenado por contornos, [21]

El cálculo de estos contornos adicionales requiere de un razonamiento geométrico, en la literatura se presentan diversos métodos [19, 28, 14].

- Vacío en el núcleo de la pieza [29, 25]: se produce cuando el contorno más pequeño no cubre el área restante, usualmente en el centro de la capa.
- Encuentro entre contornos internos y externos: existen dos tipos de contornos, los generados por el perímetro externo de la pieza y aquellos generados por los huecos o perímetros internos que la pieza pueda tener. Cuando los contornos desplazados de dos tipos se encuentran y no hay espacio para generar un contorno de intersección, se produce un vacío.
- Cambio de forma: cuando dos contornos intersectan formando un contorno irregular, este cambio de forma provoca vacíos. Determinadas geometrías provocan que los contornos cambien críticamente al hacerse cada vez más pequeños. Este cambio deja vacíos entre un contorno y otro.
- Vacío en esquina [30, 31]: para ángulos inferiores a 60 grados llenar completamente con filamentos o gotas de grosor fijo es imposible. Más allá de la inexactitud geométrica que se genera en el primer contorno, ese vacío se reproduce consecutivamente entre contornos.

Figuras y una definición más extensa de estas limitaciones pueden encontrarse en la versión en inglés del proyecto, presente en el anexo A.

3.3. Rellenado denso

Esta estrategia se desarrolla específicamente para la tecnología de impresión por gotas. La característica de imprimir en gotas independientes permite la disposición de las mismas en lo que se denomina como formación circular densa, representada en la figura 3.4.

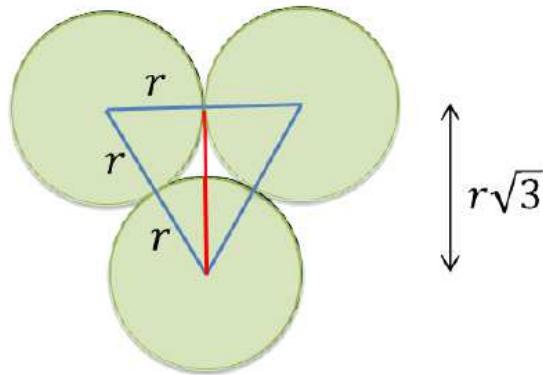


Figura 3.4: Formación circular densa, [32]

Esta disposición se deposita sobre unas líneas de mallado de manera similar al relleno por mallado. Un ejemplo se presenta en la figura 3.5.

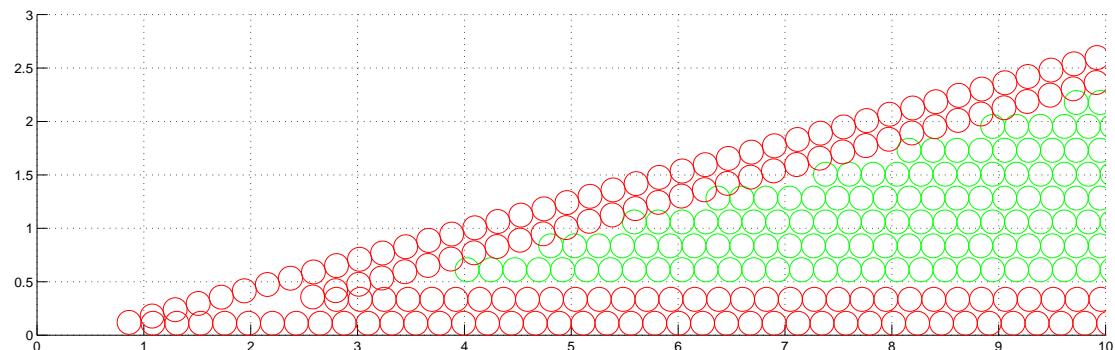


Figura 3.5: Ejemplo de relleno denso, simulado con MATLAB

Las limitaciones de esta estrategia son a su vez similares a las del relleno por mallado. En el área en el que el relleno denso contacta con los contornos se pueden producir vacíos.

Capítulo 4

Desarrollo del Algoritmo

4.1. Rellenado de Vacíos

Una vez determinado el objetivo exacto de mejora, llenar o evitar los vacíos que se pudieran generar en la fase de relleno de capas, La idea entonces es desarrollar un algoritmo para detectar esos vacíos y llenarlos, la figura 4.1 presenta el boceto conceptual del algoritmo.

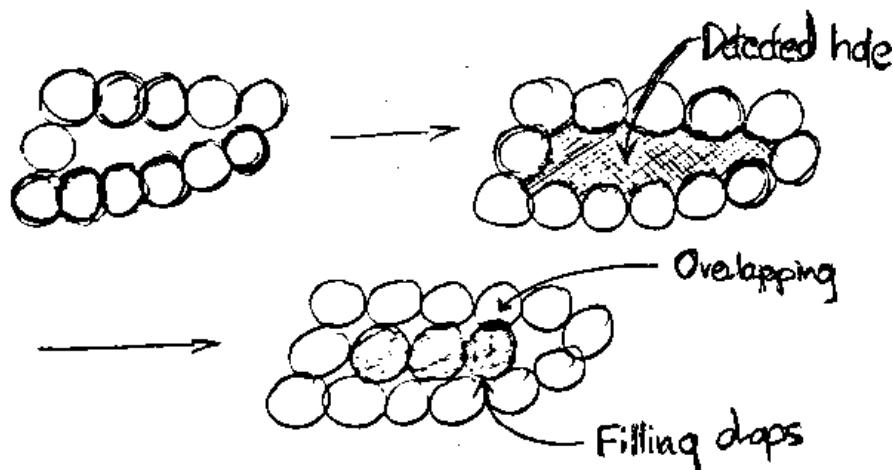


Figura 4.1: Idea de funcionamiento

En la imagen se puede observar que para obtener un relleno amplio del hueco se debe permitir cierto grado de solapamiento (overlapping). El concepto de solapamiento se trata en el anexo B.

Como primer paso, se procede a realizar una investigación sobre cómo detectar este tipo de huecos. La tecnología sobre la que se aplicará este algoritmo se basa en la deposición de gotas capa a capa. Las gotas que forman una capa se pueden tomar como una nube de puntos. Con esta idea, se encontró trabajo previo en campos como: gráficos

por ordenador o redes de comunicación. En especial dos artículos, [33, 34], proponen como métodos para detectar espacios vacíos: vecinos más próximos y diagramas de Voronoi, respectivamente. Estas dos aproximaciones fueron implementadas para resolver el problema.

La idea de utilizar un algoritmo de vecinos más próximos se basa en detectar aquellas gotas que tengan menos vecinos y que estos estén dispuestos de determinada manera, es decir, que estas gotas representen la frontera entre la nube de puntos y el vacío. En el caso del diagrama de Voronoi, explicado en el anexo C, los vértices de los polígonos de Voronoi están a la misma distancia de todas las gotas que comparten dicho vértice en sus polígonos. Así, estos vértices marcarán los vacíos que se estén produciendo.

En ambos casos se producen puntos que marcan los vacíos que puedan aparecer. Estos puntos son filtrados escogiendo aquellos que no superen cierto grado de solapamiento.

Ambas aproximaciones fueron comparadas para escoger la más rápida en tiempo de ejecución. Una de las características de las tecnologías de prototipado rápido es, como su propio nombre indica, la velocidad el proceso. Cuando más rápido pueda realizarse el conjunto de las fases, mejor. En el anexo D.3 se presenta el gráfico con el resultado de pruebas de tiempo con diferentes modelos de pieza. Los resultados dieron a la aproximación con diagramas de Voronoi como la más rápida.

El siguiente paso, una vez detectados los posibles vacíos, es, permitiendo cierto grado de solapamiento, filtrar los puntos y construir una línea con ellos, ordenándolos con su vecino más cercano. Esta línea se usará como guía para calcular la posición de las nuevas gotas que llenarán el vacío. Un ejemplo del proceso completo, detección y llenado, se presenta en el anexo D.

4.2. Descripción del Proceso

Una vez desarrolladas las herramientas y aproximaciones necesarias para resolver los problemas objetivo, se procede a implementar el programa final. En la figura 4.2 se presenta el diagrama de flujo que sigue el programa.

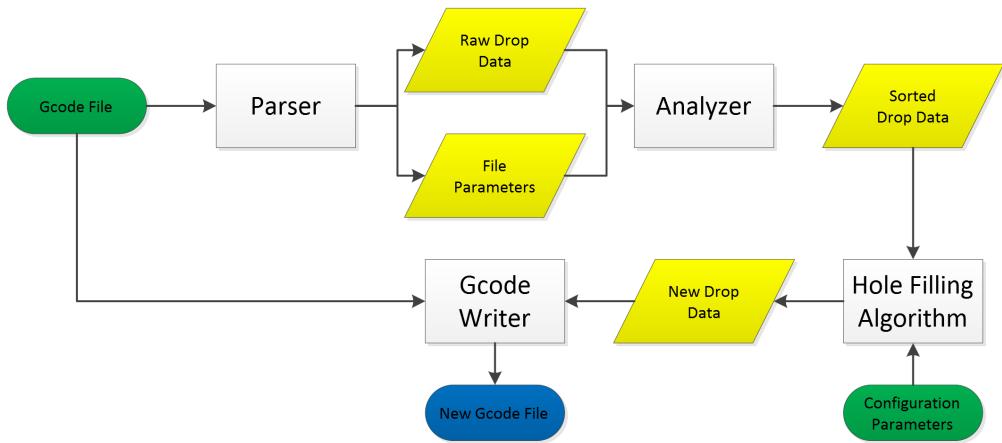


Figura 4.2: Diagrama de flujo

La entrada o “input” del programa es el fichero de G-Code que contiene el relleno previo de un modelo determinado. En este relleno pueden aparecer vacíos que serán el objetivo del programa. Un fragmento de ejemplo de G-Code puede verse en el anexo E.

Un primer módulo, el “parser”, leerá el fichero de entrada, almacenando las coordenadas de cada gota, así como la orden específica para cada gota. Además, los ficheros contienen una serie de datos en cabecera que determinarán más características del relleno previo del modelo.

Con estos datos almacenados, el analizador construirá el modelo internamente, asignando a cada gota la característica correspondiente, sea la gota parte del contorno o parte del relleno. Así como la capa a la que pertenece cada gota.

Con esta organización el algoritmo presentado en la sección anterior puede buscar los vacíos que existan en el relleno previo y de acuerdo con el parámetro de configuración, esto es, el solapamiento permitido, generará la información sobre las nuevas gotas que rellenan los vacíos encontrados.

Finalmente se generará un nuevo fichero G-Code combinando las nuevas gotas con las del relleno previo.

Los diagramas para cada módulo se presentan en el anexo F.

4.3. Características Distintivas

Este programa presenta una serie de características distintivas:

- El relleno de cada vacío encontrado se realiza de forma individual e independientemente de otros vacíos. Esto lo distingue de las estrategias de relleno comunes que afectan a toda la capa por igual.

- El proceso es una adición a cualquier otra estrategia de relleno previo, es decir, es independiente de la estrategia a mejorar.
- El grado de solapamiento puede ser libremente escogido y repercutirá en el resultado final. Este efecto se exemplifica en el anexo D.6 a través de varias ejecuciones del mismo modelo con diferentes grados de solapamiento.

Capítulo 5

Experimentos

Para comprobar el correcto funcionamiento y la consecución de los objetivos por parte del programa se proponen una serie de experimentos. El primero de ellos, sin salir del entorno de MATLAB, medirá el solapamiento total producido por las nuevas gotas añadidas. Otros 3 experimentos trabajarán con unas series de piezas impresas con o sin el nuevo programa para observar las diferencias entre dichas series. Estos 3 experimentos son: un análisis bajo microscopio, una medición de la rugosidad y un test de flexión.

5.1. Test en MATLAB

Utilizando el concepto de solapamiento, explicado en el anexo B, se calcula el solapamiento provocado por todas las nuevas gotas añadidas que se solapen con gotas del relleno previo.

Para esta prueba se escogen 3 modelos diferentes, que pueden verse en el anexo G.1, llenados con las 3 estrategias disponibles y se ejecutan varias simulaciones, con diferentes grados de solapamiento.

El objetivo del experimento es comprobar si el grado de solapamiento es superado en algún momento y observar como varía el solapamiento total al aumentar el grado de solapamiento.

5.2. Series Impresas

Para los siguientes experimentos se imprimieron 4 series de 10 piezas cada una, 2 de ellas con relleno de contornos y las otras 2 con relleno denso, una con la nueva implementación y otra si ella, respectivamente.

El modelo elegido para la impresión se presenta en la figura 5.1. En este modelo aparecen diferentes tipos de vacíos, lo que lo hace una buena elección para probar el algoritmo en diferentes casos.

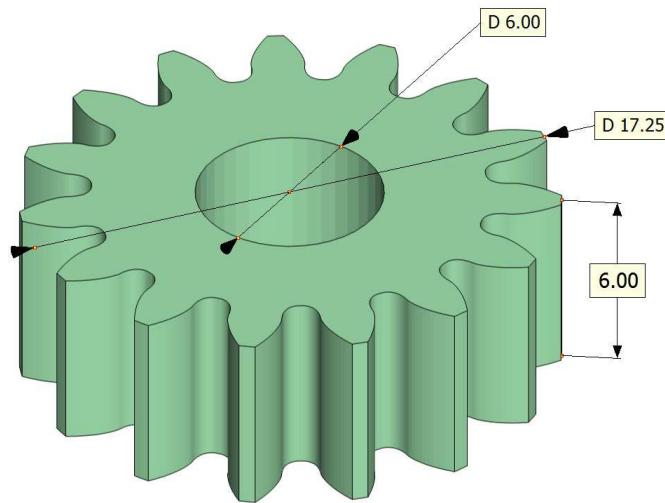


Figura 5.1: Modelo elegido para impresión, dimensiones en *mm*

El grado de solapamiento escogido es 20 %. Las piezas fueron impresas con el material: BASF TERLURAN GP-35.

5.3. Análisis con Microscopio

Como primer análisis de las piezas impresas se lleva a cabo una medición de las mismas mediante el uso de un microscopio calibrado.

El equipamiento del que se dispone es el siguiente:

- Conrad DP-M17 USB Digital Microscope.
- Wild Heerbrugg M5A
- Moticam 1000 1.3M Pixel USB2.0
- Motic Images Plus 2.0 ML

El microscopio de mano Conrad permite tomar rápidamente imágenes de todas las piezas para observar las diferencias en su superficie. Este primer análisis permite filtrar las piezas que serán medidas con el microscopio M5A. Este tiene unida una webcam Moticam que tras calibrarla con el software propietario Images Plus, permite medir la superficie de los vacíos que puedan aparecer en la capa superior de las piezas.

Así pues, se seleccionan las piezas que presentan los mayores vacíos en cada serie para medirlos y posteriormente comparar los resultados.

En el anexo G.2 se presentan imágenes del equipamiento utilizado en el análisis y ejemplos de la medición en el programa utilizado.

5.4. Medición de la Rugosidad

Si el tamaño de los vacíos disminuye al aplicar el algoritmo desarrollado, es de esperar que la rugosidad en la capa externa de la pieza se vea reducida. Para comprobar este hecho se ejecuta un experimento de medición de la rugosidad en la capa superior de las piezas de las 4 series.

Para ello se utiliza un rugosímetro Mahr Perthometer M2. En cada pieza se realizan varias medidas en diferentes posiciones y direcciones de la capa superior.

En el anexo G.3 se puede ver el rugosímetro empleado.

5.5. Ensayo de Flexión

Uno de los efectos de llenar los vacíos que una pieza pueda presentar es el de un aumento en la densidad y consecuentemente las capacidades mecánicas de la pieza. Para comprobar esta mejora se prepara un ensayo de flexión de 3 puntos con el equipamiento disponible. Un pistón de presión controlado manualmente que dispone de dos sensores, uno de fuerza (5kN) y otro de desplazamiento, ambos conectados a un monitor digital que construye las curvas de tensión-desplazamiento y las exporta a un ordenador.

Este ensayo es lo que se denomina un ensayo destructivo y por lo tanto se realiza en último lugar. Las 4 series son analizadas y los resultados almacenados.

Imágenes del equipamiento y el funcionamiento del ensayo pueden verse en el anexo G.4.

Capítulo 6

Resultados de los Experimentos

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados de los experimentos. Todos los datos almacenados y las imágenes tomadas se encuentran en los correspondientes anexos.

Cuando los datos impliquen una comparación entre las series de piezas impresas se les aplicará una prueba t de Student para determinar la significancia de los resultados. En el anexo H se adjunta la tabla con los valores utilizados.

6.1. Test en MATLAB

En ninguna de las ejecuciones lanzadas el grado de solapamiento superó al permitido. Se observa también que el solapamiento incrementa de manera rápida sin dar lugar a un óptimo en el grado de solapamiento que se pueda escoger o determinar para cada modelo.

Una conclusión preliminar con estos datos es la de recomendar al usuario lanzar simulaciones previas a la impresión para decidir qué grado de solapamiento es el óptimo para el modelo en cuestión.

Como consejo se recomienda mantenerse en un 10 % de solapamiento final en la pieza.

En el anexo I.1 se adjuntan todas las tablas de resultados numéricos del test, así como un ejemplo de simulación con diferentes grados de solapamiento.

6.2. Análisis con Microscopio

Con el análisis preliminar del primer microscopio se observan directamente resultados positivos en la reducción de vacíos, como demuestra la figura 6.1.

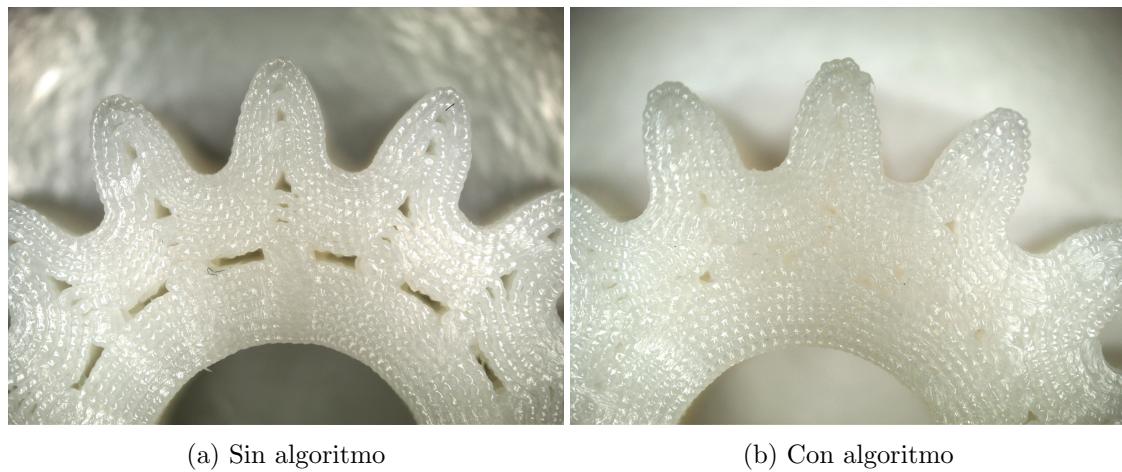


Figura 6.1: Comparación de piezas rellenas con contornos

Las mediciones con el M5A de los vacíos con superficie máxima dan como resultado la siguiente comparativa, en la figura 6.2

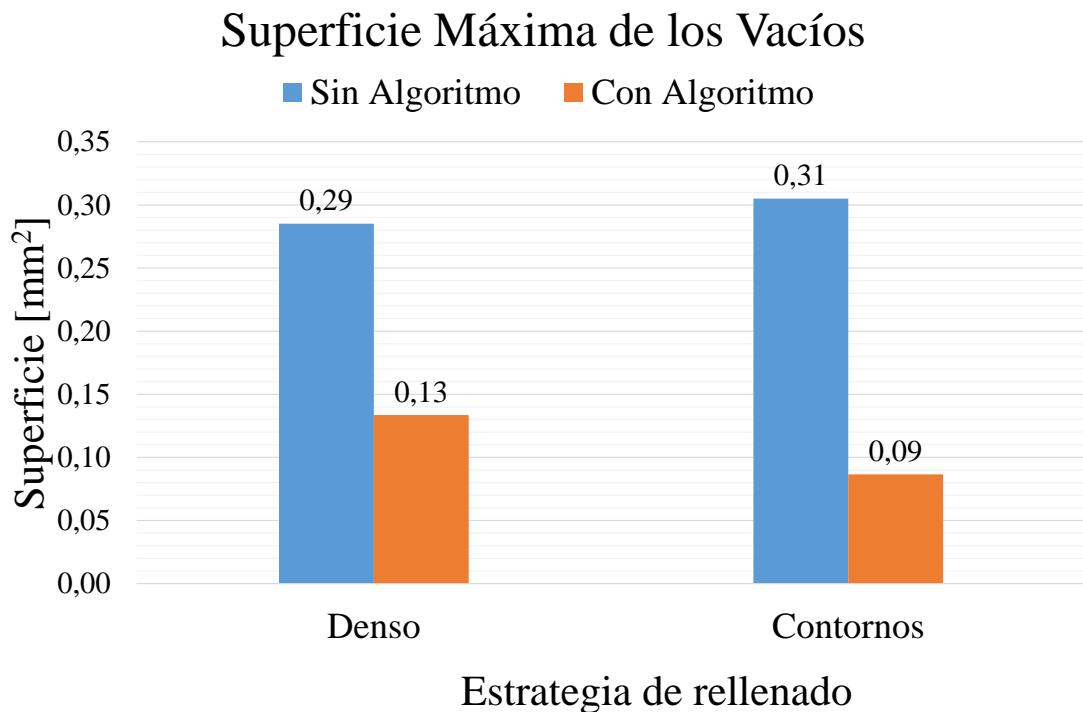


Figura 6.2: Resultado de medición

Los datos dan un descenso del tamaño de los vacíos del 50 % y 70 % respectivamente en relleno denso y con contornos. Con estos datos y las imágenes presentadas se puede

concluir que el algoritmo es efectivo en cuanto a la reducción del tamaño y el número de los vacíos producidos en rellenados no óptimos.

6.3. Medición de la Rugosidad

Las mediciones de rugosidad para las series impresas con la estrategia de contornos resultaron en un descenso de la rugosidad en la capa superior del 21 %, con los siguientes datos:

Cuadro 6.1: Resultados ensayo de rugosidad

		Algoritmo	
Rugosidad [μm^2]	Sin	Con	
Media	5,88	4,64	
Desviación Típica	1,31	1,13	
Tamaño Muestral	18	15	

La prueba t de Student da un valor de t de 2.93 para una n de 31, indicando una significancia superior al 99,5 %. Por lo tanto, el resultado se puede tomar como válido.

Para el caso de relleno denso los valores que diferían se encontraban en áreas que resultaban muy complicadas de medir. No se obtuvieron muestras significativas para este caso.

Los resultados numéricos empleados en los cálculos se presentan en el anexo I.2.

6.4. Ensayo de Flexión

Para las series con la estrategia de contornos los resultados dan una mejoría del 8 % en la tensión máxima de fractura con los siguientes datos:

Cuadro 6.2: Resultados ensayo de flexión

		Algoritmo	
Tensión (kN)	Sin	Con	
Media	0,69	0,74	
Desviación Típica	0,03	0,05	
Tamaño Muestral	9	8	

La prueba t de Student da un valor de t de 2.87 para una n de 15, indicando una significancia superior al 99 %. Por lo tanto, el resultado se puede tomar como válido. En la figura 6.3 se presenta un ejemplo de las curvas de tensión desplazamiento.

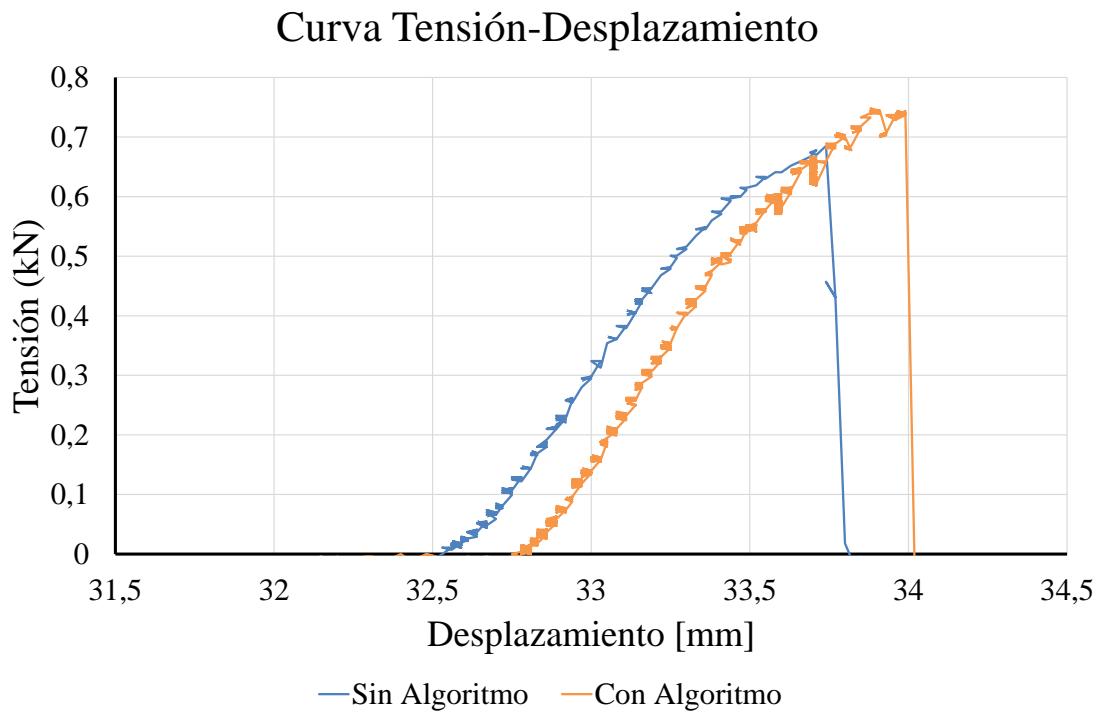


Figura 6.3: Ejemplo de flexión

En el caso del relleno denso la diferencia entre las dos series no es suficiente para dar una valoración significativa. Esto puede deberse a la aparición de menos vacíos que en el caso de relleno con contornos.

El resto de resultados numéricos se presentan en el anexo I.3.

Capítulo 7

Conclusiones

El prototipado rápido es un campo de la tecnología de fabricación que une diferentes ramas de la ingeniería para ofrecer una construcción automatizada, rápida y fiable de modelos y prototipos concebidos por ordenador. Dentro de este campo se pueden encontrar diversas tecnologías que difieren en métodos y materiales pero comparten el proceso general de funcionamiento.

Una de estas tecnologías es la deposición de gotas de plástico fundido. En el instituto MIMED en el que se ha desarrollado este proyecto, una línea de investigación trabajaba en el desarrollo de software para mejorar los resultados de esta tecnología en la impresión de piezas. Este proyecto parte de ese trabajo previo y realiza una aportación en la fase de relleno de capas. Como se ha presentado previamente, en la fase de investigación previa a tratar el problema, se definieron las limitaciones de las estrategias actualmente en uso para completar dicha fase de relleno. Con esta investigación se posibilitó una definición estricta del problema a tratar.

Con esta definición del problema o tarea a realizar se propusieron diversas aproximaciones, de las cuales se escogió la más rápida en términos de tiempo de ejecución. La idea inicial del proyecto era integrar el algoritmo en el software preexistente desarrollado en el instituto. Para permitir un mayor enfoque en el desarrollo del algoritmo se decidió trabajar primero en un entorno de MATLAB para después transportar el trabajo al programa completo. Este último paso no se llevó a cabo, decidiéndose en su lugar dedicar el tiempo a realizar más pruebas experimentales.

Así pues, al implementar el algoritmo de manera externa, se requirió de código adicional para analizar los datos producidos por el programa previo y así poder tratarlos.

Una vez terminada la implementación se procedió a ejecutar una serie de ensayos para probar que la tarea en cuestión estaba siendo completada y qué grado de mejora suponía la aplicación del algoritmo. Los resultados de estos ensayos dieron una respuesta positiva a la cuestión del relleno de huecos y también mostraron una mejoría en ciertas características mecánicas.

Durante los ensayos también se observó que las diferencias entre piezas con algoritmo y piezas si el son mayores cuando la pieza en cuestión presenta inicialmente un gran número de vacíos. Puede parecer obvio pero también hay que considerar si merece la

pena aplicar el algoritmo cuando el número de vacíos no es suficientemente grande para marcar una diferencia significativa.

El objetivo del proyecto se ha cumplido correctamente, los vacíos que aparecen en las capas son detectados y rellenados. La investigación realizada representa un análisis del estado del arte en el ámbito del desarrollo de software para impresión 3D, específicamente en la fase de relleno de capas. Las conclusiones de la investigación dieron como resultado la ya mencionada clasificación de vacíos y un escaso trabajo previo en el relleno o prevención de este tipo de vacíos. Un hecho interesante fue el de encontrar las ideas que llevaron a la solución del problema en campos que poco o nada tienen que ver con la impresión 3D. La base matemática de buscar huecos en espacios geométricos es la misma en dichos campos y esto permitió exportar dichas ideas para su implementación.

Como se ha mencionado previamente, una vez desarrollado y probado el algoritmo, el siguiente paso consistiría en su integración en el programa completo. Este programa desarrollado en el instituto está escrito en C++. La característica distintiva de la implementación propuesta es el uso de diagramas de Voronoi, una búsqueda ofrece implementaciones del cálculo de dichos diagramas en C++ [35] lo cual permitiría una sencilla integración del algoritmo en el programa completo.

Otra propuesta sería la realización de una mayor número de experimentos con una mayor variedad de modelos impresos para localizar o fijar en qué casos es necesaria la aplicación del algoritmo. Profundizar en la mejoría de las características mecánicas de las piezas impresas ampliaría el campo de aplicación de las tecnologías de impresión 3D hacia un método de fabricación final y no solo de modelado o prototipado.

Durante la realización del proyecto se dieron diversas incidencias que resumo a continuación. Este ha sido mi proyecto fin de carrera, como tal su función es probar las capacidades y conocimientos adquiridos a lo largo de mis estudios de ingeniería industrial. Un campo como el de la impresión 3D representa la unión de una gran variedad de ramas de la ingeniería, como es la informática, la fabricación, la tecnología de materiales o el desarrollo de producto. He podido experimentar como es un trabajo de investigación y lo necesario que es realizarlo para poder ofrecer una aportación significativa. También he experimentado la relación universidad-empresa, en cuanto a los programas de investigación compartidos y los problemas que eso a veces conlleva, pues estuvimos limitados en la cantidad de piezas que la empresa nos pudo imprimir.

Finalmente puedo decir que considero que he aprendido mucho durante la realización del proyecto y que mi impresión inicial de que tras los años de carrera los conocimientos resultan difíciles de mantener o parecen innecesarios ha cambiado totalmente, pues es durante la experiencia de campo, cuando me he enfrentado a los problemas con una responsabilidad directa, me he sentido preparado para afrontarlos y resolverlos.

Índice de figuras

2.1. Estereolitografía, [10]	11
2.2. Sinterizado selectivo por láser, [11]	11
2.3. Modelado por deposición fundida, [12]	12
2.4. Impresora por gotas, [14]	13
3.1. Rellenado por mallado, [21]	16
3.2. Vacíos generados, [27]	17
3.3. Rellenado por contornos, [21]	17
3.4. Formación circular densa, [32]	18
3.5. Ejemplo de relleno denso, simulado con MATLAB	19
4.1. Idea de funcionamiento	20
4.2. Diagrama de flujo	22
5.1. Modelo elegido para impresión, dimensiones en <i>mm</i>	25
6.1. Comparación de piezas rellenadas con contornos	28
6.2. Resultado de medición	28
6.3. Ejemplo de flexión	30
B.1. Gotas situadas a una distancia <i>d</i> se solapan	135
C.1. Diagrama de Voronoi generado en MATLAB	136
D.1. Proceso del método con Voronoi, simulado en MATLAB	138
D.2. Proceso de relleno, simulado en MATLAB	139
D.3. Resultados de la Comparativa	140
D.4. Proceso de vecinos más cercanos, simulado en MATLAB	141
D.5. Ejemplo de relleno por mallado, simulado con MATLAB	142
D.6. Ejemplo de relleno por contornos, simulado con MATLAB	142
D.7. Ejemplo de relleno denso, simulado con MATLAB	142
D.8. Ejemplo con diferentes grados de solapamiento, simulado en MATLAB . .	143
F.1. Diagrama de flujo del Parser	146
F.2. Diagrama de flujo del Analyzer	147

F.3. Diagrama de flujo del relleno de vacíos	148
G.1. Modelos usados en el test de MATLAB. La disposición de la imágenes es, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: frontal, lateral, planta y perspectiva isométrica.	150
G.2. Part of the equipment used in the experiment	151
G.3. Medición de la superficie	152
G.4. Rugosímetro empleado, [Julian Müller, 2014]	153
G.5. Equipamiento usado en el ensayo de flexión	154
G.6. Proceso de ensayo	155
H.1. Tabla T de Student utilizada en los cálculos	157

Índice de cuadros

6.1. Resultados ensayo de rugosidad	29
6.2. Resultados ensayo de flexión	29
I.1. Resultados de la simulación con relleno por contornos	159
I.2. Resultados de la simulación con relleno por mallado	160
I.3. Resultados de la simulación con relleno denso	160
I.4. Mediciones del ensayo de rugosidad	161
I.5. Tabla de tensiones de fractura	162

Bibliografía

- [1] Grimm, T. (2004): “User’s Guide to Rapid Prototyping”, *Society of Manufacturing Engineers*.
- [2] Moon, S. K.; Tan, Y. E.; Hwang, J.; Yoon, Y. (2014): “Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol.1, num.3, pp. 223-228.
- [3] Stratasys (2013): “Additive Manufacturing Reduces Tooling Cost and Lead Time to Produce Composite Aerospace Parts”, http://www.stratasys.com/~/media/Case%20Studies/Aerospace/SSYS-CS_Fortus-ACS-05-13.pdf.
- [4] Straub, J. (2014): “Design and fabrication of reconstructive mandibular models using fused deposition modeling”, *Aerospace Conference, 2014 IEEE*, pp. 1–7.
- [5] Pullen, D.; Sapuan, S. M. (2005): “Concurrent design and manufacturing process of automotive composite components”, *Assembly Automation*, vol.25, num.2, pp. 146-152.
- [6] Bibb, R.; Eggbeer, D.; Evans, P. (2009): “Rapid prototyping technologies in soft tissue facial prosthetics: current state of the art”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.16, num.2, pp. 130–137.
- [7] Chimento, J.; Highsmith, M. J.; Crane, N. (2011): “3D printed tooling for thermo-forming of medical devices”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.17, num.5, pp. 387–392.
- [8] Kouhi, E.; Masood, S.; Morsi, Y. (2008): “Design and fabrication of reconstructive mandibular models using fused deposition modeling”, *Assembly Automation*, vol.28, num.3, pp. 246–254.
- [9] Schwaiger, J. (2013): “Codegenerierung für einen neuen 3D-Druckprozess auf Tropfenbasis”, *TUM MiMed*, Doctoral thesis to be published.
- [10] Materialgeeza (2008): “Stereolithography apparatus”, Own work. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons., https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stereolithography_apparatus.jpg.

- [11] Materialgeeza (2008): “Selective laser melting system schematic”, Own work. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons., https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg.
- [12] Kidor (2013): “Hole Force Lines”, Own work based on File:HoleForceLines.gif. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons., <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HoleForceLines.svg>.
- [13] MakerBot (2014): “MAKERBOT REPLICATOR MINI”, MakerBot® Industries, LLC, <http://store.makerbot.com/replicator-mini>.
- [14] Schwaiger, J; Lüth, T. C.; Irlinger, F. (2013): “G-Code Generation for a New Printing Process Based on 3D Plastic Polymer Droplet Generation”, *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, .
- [15] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. (2010): “Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, *Springer*.
- [16] Liou, F. W. (2008): “Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development”, *CRC Press*.
- [17] Szabó, P. G.; Markót, M. Cs.; Csendes, T.; Specht, E.; Casado, L. G.; García, I. (2007): “New Approaches to Circle Packing in a Square”, *Springer*.
- [18] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. (2010): “Rapid Prototyping: Principles and Applications”, *Society of Manufacturing Engineers*.
- [19] Jin, G. Q.; Li, W. D.; Tsai, C. F.; Wang, L. (2011): “Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol.30, pp. 154–164.
- [20] Jin, G. Q.; Li, W. D.; Gao, L. (2013): “An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol.29, pp. 23–38.
- [21] Zhou, M. Y. (2004): “Path planning of functionally graded material objects for layered manufacturing”, *International Journal of Production Research*, vol.42, num.2, pp. 405–415.
- [22] Nancharaiah, T.; Raju, D. R.; Raju, V.R. (2010): “An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components”, *International Journal on Emerging Technologies*, vol.1, pp. 106–111.
- [23] Nevin, H.; Mehrdad, H. (2014): “Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.20, num.3, pp. 221–227.

- [24] Han, W.; Jafari, M. A.; Seyed, K. (2003): “Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.9, num.4, pp. 212–218.
- [25] Agarwala, M. K.; Jamalabad, V. R.; Langrana, N. A.; Safari, A.; Whalen, P. J.; Danforth, S. C. (1996): “Structural quality of parts processed by fused deposition”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.2, num.4, pp. 4–19.
- [26] Qiu, D.; Langrana, N. A.; Danforth, S. C.; Safari, A.; Jafari, M. (2001): “Intelligent Toolpath for Extrusion-based LM Process”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.7, num.1, pp. 18–23.
- [27] Volpato, N.; Silveira, J. H.; de Souza, T. R. (2005): “A Process Planning Application for Rapid Prototyping Technology”, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, .
- [28] Yang, Y.; Loh, H. T.; Fuh, J. Y. H.; Wang, Y. G. (2002): “Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing”, *Rapid Prototyping Journal*, vol.8, num.1, pp. 30–37.
- [29] van Weeren, R.; Agarwala, M. K.; Jamalabad, V. R.; Bandyopadhyay, A.; Vaidyanathan, R.; Langrana, N. A.; Safari, A.; Whalen, P.; Danforth, S.; Ballard, C. (1995): “Quality of Parts Processed by Fused Deposition”, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 314–321.
- [30] Brooks, H. L.; Rennie, A. E. W.; Abram, T. N.; McGovern, J.; Caron, F. (2011): “Variable Fused Deposition Modelling – Analysis of Benefits, Concept Design and Tool Path Generation”, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 511–517.
- [31] Prsa, J.; Irlinger, F.; Lueth, T. C. (2014): “Algorithm for Detecting and Solving the Problem of Under Filled Pointed Ends Based on 3d Printing Plastic Droplet Generation”, *IMECE 2014*, pp. 1-10.
- [32] Prša, J.; Schwaiger, J.; Irlinger, F.; Lüth, T. C. (2013): “Dense 3D-Packing Algorithm for Filling the Offset Contours of a New Printing Process Based on 3D Plastic Droplet Generation”, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 74–78.
- [33] Bi, K.; Gu, N.; Tu, K.; Dong, W. (2006): “Neighborhood-Based Distributed Topological Hole Detection Algorithm in Sensor Networks”, *International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks*, .
- [34] Zhang, Y.; Zhang, X.; Wang, Z.; Liu, H. (2013): “Virtual Edge Based Coverage Hole Detection Algorithm in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1488–1492.

- [35] SteveFortune (2008): “Fortune’s 2D Voronoi diagram code”, <http://www3.cs.stonybrook.edu/~algorith/implement/fortune/implement.shtml>.
- [36] Weisstein, E. W.: “Voronoi Diagram”, *From MathWorld—A Wolfram Web Resource*, <http://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html>.