



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Mecánica

**GENERACIÓN DE SOPORTES PARA LA MANUFACTURA
ADITIVA A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA
CON CONTROL DE ESCALA DE LONGITUD**



Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

Joaquín Castro Cruces
CONCEPCIÓN - CHILE
2021

Profesores Guías: Carlos Medina M.
Paulo Flores V.
Dpto. Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer enormemente a Eduardo que me dio la oportunidad de trabajar en un tema que hace tiempo me interesaba. Agradezco todo su apoyo, ya que sin él este trabajo no habría sido posible. De verdad muchas gracias por toda tu buena onda, por estar constantemente motivándome a aprender más del tema, responder a cada una de mis preguntas e incentivar me a participar en distintos webinars y congresos.

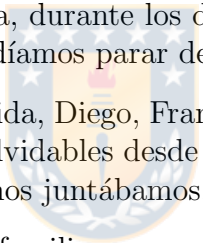
También, quiero agradecer al profe Paulo y al profe Carlos por toda su simpatía y disposición. Gracias por permitirme trabajar en este tema, por darse el tiempo de responder ayudarme con las distintas dificultades que se me presentaban, y por poner a disposición cada uno de los equipos que se utilizaron en este trabajo. También quiero agradecer al Benja, quien me ayudo con la mayoría de las impresiones 3D que utilice en este trabajo.

Obviamente agradecer a cada unos de los profesores del departamento de ingeniería mecánica, agradecerles su disposición, carisma y buena onda durante todo mi periodo en la carrera.

Quiero agradecer a mis amigos Seba, Jorge y Cristóbal por todos los momentos que compartimos a lo largo de la carrera y del magíster. Por todas las experiencias que pudimos disfrutar durante las largas ventanas que teníamos cada día, durante los distintos trabajos que nos tocaba como equipo y las incontables veces que no podíamos parar de reír.

Muchas gracias a mis amigos de toda la vida, Diego, Franco, Javier, Cajito y Xavi. Con quienes tuve el gusto de compartir momentos inolvidables desde que nos conocimos en el colegio, y que siempre me sacaron una sonrisa cuando nos juntábamos.

Finalmente, quiero agradecer a toda mi familia por apoyarme desde siempre y por compartir grandes momentos durante toda mi vida. Muchas gracias a mi hermano, mi hermana, mis padres, abuelos, tíos y primos, que gracias a su apoyo pude terminar esta etapa de mi vida.



Resumen

La manufactura aditiva se ha vuelto un proceso de manufactura con gran relevancia en muchas industrias debido a su capacidad de fabricar geometrías complejas, esta característica permite que se pueda sacar provecho de métodos como lo son la optimización topológica para poder crear piezas de alto desempeño. Sin embargo, esta versatilidad al momento de fabricar geometrías complejas suele deberse al uso de estructuras de soporte que son necesarias para dar el sustento mecánico que necesitan las partes sobresaliente de la pieza que se desea imprimir. Estos soportes implican el uso de una mayor cantidad de material, mayores tiempos de fabricación y su posterior extracción implica mayores dificultades y costos al momento de fabricar la pieza.

Por tal motivo, reducir la cantidad de material que utilizan estos soportes resulta beneficioso para poder sacar el máximo provecho de esta tecnología. El objetivo de este trabajo consiste en generar estructuras de soporte que sean eficiente, es decir, que utilicen la menor cantidad de material posible, y que sean fáciles de remover. Estos soportes son generados a través de optimización topológica respetando una serie de pautas geométricas obtenidas para la impresora Ultimaker S2⁺.

Para lograr este objetivo, se imprimen una serie de piezas que permiten obtener valores recomendados para ciertos tipos de geometrías, de manera de asegurar que los soportes sean capaces de sostener a si mismos, como también de dar sustento a la pieza de interés. Para que los diseños sigan los valores recomendados obtenidos de las pautas geométricas, se incluyen una serie de restricciones al proceso de optimización topológica. Estas restricciones influyen enormemente en el diseño de los soportes generados, por lo que se realiza un respectivo análisis de como influyen estas restricciones en los diseños finales. Finalmente, se evalúa el desempeño de la metodología desarrollada en una serie de geometrías representativas que se pueden presentar al momento de imprimir una pieza.

A través de esta metodología, se obtienen soportes que cumplen con cada una de las pautas geométricas que se obtuvieron para la impresora utilizada. Soportes que cumplen con la característica de ser eficientes y de poseer pequeñas áreas de contacto, lo cual, facilita su posterior remoción. Estos soportes son impresos para demostrar su imprimibilidad y eficiencia en el uso de material.

Los resultados permiten concluir que la optimización topológica resulta ser una buena alternativa para generar soportes eficiente y fáciles de remover, con respecto a los tradicionales métodos de generación de soportes, los cuales se basan en geometrías predefinidas. Estos soportes optimizados permiten reducir la cantidad de material utilizado entre un 10% y un 20% en comparación con los soportes generados con el software Cura de Ultimaker.

Índice de contenidos

Página

CAPÍTULO 1

Introducción	7
1.1 Hipótesis	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 Metodología	12
1.3.1 Identificación de pautas geométricas	12
1.3.2 Analizar los distintos soportes generados según los parámetros utilizados	12
1.3.3 Diseñar soportes utilizando la optimización topológica con control de es- cala de longitud	13
1.3.4 Imprimir los soportes estructurales generados con optimización topológica	13

CAPÍTULO 2

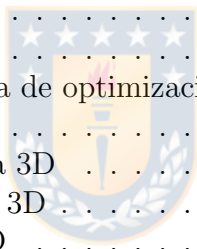
Marco teórico	15
2.1 Optimización topológica	15
2.1.1 Formulación del problema de optimización topológica	15
2.2 Manufactura aditiva	18
2.2.1 Como imprimir una pieza 3D	19
2.2.2 Tecnologías de impresión 3D	19
2.2.3 Software de impresión 3D	20
2.2.4 Materiales de impresión 3D	22
2.2.5 Partes de la impresora 3D	23

CAPÍTULO 3

Formulación del problema de optimización topológica	25
3.1 Esquema de tres campos	25
3.1.1 Campo filtrado	25
3.1.2 Proyección	27
3.1.3 Formulación robusta	28
3.2 Interpolación SIMP	28
3.3 Solución numérica del problema de optimización	29
3.4 Tamaño mínimo en la fase vacía y sólida	30
3.5 Tamaño máximo	30
3.6 Tamaño mínimo variable	31
3.7 Restricción de ángulo de inclinación	32

CAPÍTULO 4

Pautas geométricas de la manufactura aditiva para la generación de soportes	33
4.1 Pautas geométricas para el control de longitud de los soportes	35
4.1.1 Mínimo espesor de pared	36



4.1.2	Mínimo tamaño de agujero	37
4.1.3	Mínima separación entre miembros	37
4.1.4	Relación de aspecto	37
4.1.5	Pautas geométricas recopiladas	39
4.2	Pautas geométricas para la impresión de partes en voladizo	39
4.2.1	Máxima separación entre bordes	39
4.2.2	Máxima distancia entre apoyos simples	40
4.2.3	Ángulo crítico de inclinación	41
CAPÍTULO 5		
	Estudio de la generación de soportes	43
5.1	Formulación del problema	43
5.2	Efecto de las zonas de empotramiento	44
5.3	Efecto de la fracción de volumen	44
5.4	Efecto de la relación de aspecto del dominio	45
5.5	Distancia entre los soportes y la pieza a imprimir	47
5.6	Cambio lineal de tamaño mínimo	48
5.7	Restricción de máximo tamaño	49
5.8	Separación entre los puntos de contacto	50
5.8.1	Mínima separación entre ramas	50
5.8.2	Uso de fuerzas puntuales	51
5.9	Generación de soportes internos	52
CAPÍTULO 6		
	Generación de soportes	55
6.1	Geometrías representativas	55
6.1.1	Puente rectangular	56
6.1.2	Puente circular	57
6.1.3	Puente triangular	58
6.1.4	Puente triangular invertido	59
6.2	Caso con geometría compleja	60
CAPÍTULO 7		
	Conclusiones y perspectivas	65
7.1	Conclusiones	65



Índice de figuras

1.1	Costo anual de producción de piezas finales mediante la manufactura aditiva en todo el mundo. Los valores están en miles de millones de dólares.	7
1.2	Pieza de metal fabricada con manufactura aditiva. En rojo se muestran los soportes utilizados para fabricar la pieza, mientras que el material blanco corresponde al material cerámico que se encuentra entre los soportes y la pieza. . . .	8
1.3	En (a) soportes generados por el software Meshmixer. En (b) soportes generados en el trabajo de Vanek et al. En (c) soportes generados en el trabajo de Feng et al.	9
1.4	Optimización topológica con control de escala de longitud de estructuras de anclaje para un estanque de combustible de un avión.	9
1.5	Las imágenes muestran en color verde el material de soporte necesario para imprimir la pieza central de la Figura 1.4. (a) muestra la pieza y los soportes, mientras que (b) muestra los soportes y la pieza traslucida	11
1.6	Soportes generados con optimización topológica utilizando diferentes restricciones de la manufactura aditiva.	11
1.7	Casos considerados para evaluar la optimización topológica propuesta para generar soportes destinados para la manufactura aditiva.	13
1.8	Impresión 3D de los soportes estructurales.	14
2.1	Minimización de la flexibilidad de una viga en voladizo utilizando un enfoque de densidades.	15
2.2	Interpolación utilizada para el enfoque de densidades.	16
2.3	En (a) foto original de mi mascota Nala. En (b) imagen obtenida al aplicar un filtro con kernel gaussiano. En (c) imagen obtenida al aplicar el mismo filtro con un radio mayor.	17
2.4	Minimización de flexibilidad de una viga en voladizo utilizando diferentes discretizaciones. De izquierda a derechas, $N_{el} = 640$, $N_{el} = 1440$ y $N_{el} = 4000$. . .	17
2.5	Función escalonada cuya pendiente es controlada por un parámetro β	18
2.6	Esquema del proceso de fabricación a través de FDM	19
2.7	Diferencia entre archivo CAD y STL.	20
2.8	Diferentes calidades de malla.	21
2.9	Ensamblaje soporte-pieza. En (a) soportes optimizados en Matlab convertidos a formato STL. En (b) pieza diseñada en Inventor que se busca imprimir. En (c) ensamblaje de los soportes con la pieza utilizando el software Meshmixer.	21
2.10	Software Cura de Ultimaker.	22
2.11	Diferencias de grosor de capa.	22
2.12	Orientación que puede tomar la pieza en el proceso de impresión 3D.	23
2.13	Diferentes porcentajes y tipos de relleno.	23
2.14	Propiedades de los distintos termoplásticos que se pueden utilizar en impresoras con tecnología FDM	24
2.15	Partes más importantes de una impresora 3D. Foto de la impresora Ultimaker s2+.	24

3.1	En a) Región abarcada por un filtro con un radio de 3 elementos. En b) función peso de las densidades de los elementos vecinos.	26
3.2	Extensión del dominio utilizando elementos con densidad cero.	27
3.3	La figura muestra el esquema de tres campos ρ , $\tilde{\rho}$, y $\bar{\rho}$. En la fase de proyección se muestran 3 funciones escalonadas que dan lugar a 3 diseños, denominados erosionado, intermedio y dilatado. Estos diseños se muestran en amarillo, naranja y rojo, respectivamente.	27
3.4	Gráficos obtenidos de forma numérica que permiten obtener los parámetros para controlar la escala de longitud.	31
3.5	En a) Región donde se aplica la restricción. En b) porcentaje vacío que debe existir dentro del área Ω_i	32
3.6	Cambio lineal de tamaño mínimo.	32
4.1	Diseño de pieza para obtener pautas geométricas de la manufactura aditiva. . . .	33
4.2	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el mínimo espesor de pared. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora donde se indica el espesor de la pared más delgada que se pudo imprimir.	36
4.3	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el mínimo tamaño de agujero. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. . . .	37
4.4	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la mínima separación entre miembros. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. . . .	37
4.5	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima relación de aspecto. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. . . .	38
4.6	En (a) foto de la cara lateral de las columnas con grandes relaciones de aspecto. En (b) foto frontal de las columnas. En (c) foto de la pieza que se utiliza para obtener la relación longitud/ángulo.	38
4.7	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima distancia entre los bordes. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. . . .	39
4.8	En (a) calidad de la superficie inferior para distancias pequeñas entre bordes. En (b) calidad de la superficie inferior para distancias más grandes entre bordes. . . .	40
4.9	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima distancia entre apoyos simples. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. . . .	40
4.10	En (a) calidad de la superficie inferior para distancias grandes entre apoyos simples. En (b) calidad de la superficie inferior para distancias pequeñas entre apoyos simples.	40
4.11	En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el ángulo crítico. En (b) esquema del perfil de la pieza a imprimir. En (c) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. En (d) perfil de la pieza impresa.	41
4.12	Distorsión de la cara inferior para ángulos pequeños.	41
5.1	Modelo de elementos finitos para la optimización topológica de los soportes. . . .	43
5.2	Arriba se muestra el modelo de elementos finitos y abajo los soportes obtenidos. En (a) se muestra el resultado al empotrar solo la base de la impresora. En (b) se incluye el empotramiento de una de las paredes de la pieza. En (c) se empotra en ambas paredes de la pieza y en la base de la impresora.	44
5.3	Soportes generados con distintas fracciones de volumen.	45
5.4	Soportes generados para diferentes relaciones de aspecto del espacio de diseño. . . .	46

5.5	En a) soporte generado sin restricción de ángulo sobresaliente. En b) soporte generado con restricción de ángulo sobresaliente.	46
5.6	Problemas presentados con los soportes que solo incluyen restricción de tamaño mínimo.	47
5.7	En a) formulación para crear espacio entre los troncos y las ramas con la pieza a imprimir. En b) resultado obtenido con el nuevo modelo.	48
5.8	En a) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo constante. En b) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo que varía linealmente con un espesor de 1.0 [mm] en la base. En c) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo que varía linealmente con un espesor de 2.0 [mm] en la base.	48
5.9	En a) soporte generado con restricción de máximo tamaño utilizando un filtro de tamaño constante. En b) soporte generado con restricción de tamaño máximo con un filtro que varía linealmente. En c) soporte generado con restricción de tamaño máximo con un filtro mayor también que varía linealmente.	49
5.10	En a) soporte generado con una máximo tamaño de 5 elementos mayor al tamaño mínimo en la base. En b) soporte generado con una máximo tamaño de 10 elementos mayor al tamaño mínimo en la base. En c) soporte generado con una máximo tamaño de 15 elementos mayor al tamaño mínimo en la base.	50
5.11	En a) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 10 elementos en el punto de contacto. En b) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 20 elementos en el punto de contacto.	51
5.12	Formulación del problema de optimización donde las fuerzas se aplican de forma puntual.	52
5.13	En a) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 10 elementos en el punto de contacto. En b) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 20 elementos en el punto de contacto.	52
5.14	Modelo de elementos finitos utilizado para generar soportes internos.	53
5.15	En a) soporte interno generado con la restricción de mínima separación entre miembros con una fracción final de volumen del 16.68%. En b) soporte interno generado con la restricción de mínima separación entre miembros con una fracción final de volumen del 26.04%	53
5.16	En a) soporte interno generado utilizando fuerzas puntuales con una fracción final de volumen del 17.62%. En b) soporte interno generado utilizando fuerzas puntuales con una fracción final de volumen del 26.45%.	54
6.1	En la figura se muestran los 4 casos de estudios que se evalúan en este trabajo. a) Puente rectangular. b) Puente circular. c) Puente triangular. d) Puente triangular invertido.	56
6.2	En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando una restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) y e) los soportes impresos en 3D.	58

6.3	En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando la restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) soportes obtenidos al aplicar un post-procesamiento a los soportes obtenidos con restricción de mínima separación entre miembros. En e) y f) los soportes impresos en 3D.	61
6.4	En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando la restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) soportes obtenidos al aplicar un post-procesamiento a los soportes obtenidos con restricción de mínima separación entre miembros. En e) y f) los soportes impresos en 3D.	62
6.5	En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando una restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) y e) los soportes impresos en 3D.	63
6.6	En la figura se muestra las diferentes zonas que se utilizan como espacio de diseño para la generación de soportes.	63
6.7	Soportes generados con optimización topológica. En a) soportes generados utilizando restricción de separación mínima. En b) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En c) y d) los soportes impresos.	64



Índice de tablas

1.1	Comparación de tiempo y material utilizado entre soportes generados con el software Cura y los soportes generados con TO.	10
1.2	Tecnologías de impresión 3D.	12
4.1	Pautas geométricas utilizadas para el control de longitud de los soportes.	34
4.2	Parámetros de impresión y especificaciones de la impresora utilizados en cada una de las piezas impresas de este trabajo.	34
4.3	Pautas geométricas utilizadas para definir cuando se deben utilizar soportes en la impresión 3D.	36
4.4	Pautas geométricas obtenidas para el control de longitud de los soportes para la impresora Ultimaker S2 ⁺	39
4.5	Clasificación de los valores para las distintas pautas geométricas según su calidad superficial.	42
6.1	Tamaño mínimo y máximo impuesto en los casos de estudio, y el valor de la fracción de volumen impuesta y obtenida al final de la optimización.	57
6.2	Comparación de masa utilizada y tiempos de impresión de los soportes generados con TO y los soportes generados utilizando el software Cura de Ultimaker.	59



Nomenclatura

D	Matriz que almacena el peso de los elementos vecinos
E	Módulo de elasticidad
f	Vector de fuerzas externas
H	Función escalonada
r	Radio
t	Matriz que contiene 1 para los desplazamientos horizontales y 0 para los verticales
u	Vector de desplazamientos
V	Volumen del espacio de diseño
v	Volumen ocupado por el elemento
w	Función peso de los elementos vecinos
x	Posición del centro de los elementos

Símbolos griegos

β	Parámetro que controla la pendiente de la función escalonada
μ	Valores umbrales utilizados en función escalonada
ρ	Densidad



Subíndices

dil	Diseño dilatado
ero	Diseño erosionado
f	Fracción
fil	Filtro
fin	Final
<i>i</i>	Elemento <i>i</i>
ini	Inicial
int	Diseño intermedio
<i>j</i>	Elemento <i>j</i>
min	Mínimo
max	Máximo
Solid	Sólido
Void	Vacío

Superíndices

dil	Diseño dilatado
ero	Diseño erosionado
int	Diseño intermedio

CAPÍTULO 1

Introducción

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, es el proceso de fabricación que consiste en añadir material capa por capa desde la base de la impresora hasta completar la pieza. Este proceso permite crear piezas 3D con geometrías complejas, abarcando una amplia variedad de aplicaciones, incluso industriales. Desde que se creó la primera impresora 3D comercial en la década de los la tecnología ha experimentado un rápido crecimiento como se puede observar en el gráfico de la Figura 1.1 obtenida de [Wholers et al., 2020]. Según el mismo autor espera que la industria global de la impresión 3D supere los 21 mil millones de dólares en ingresos mundiales para 2020.

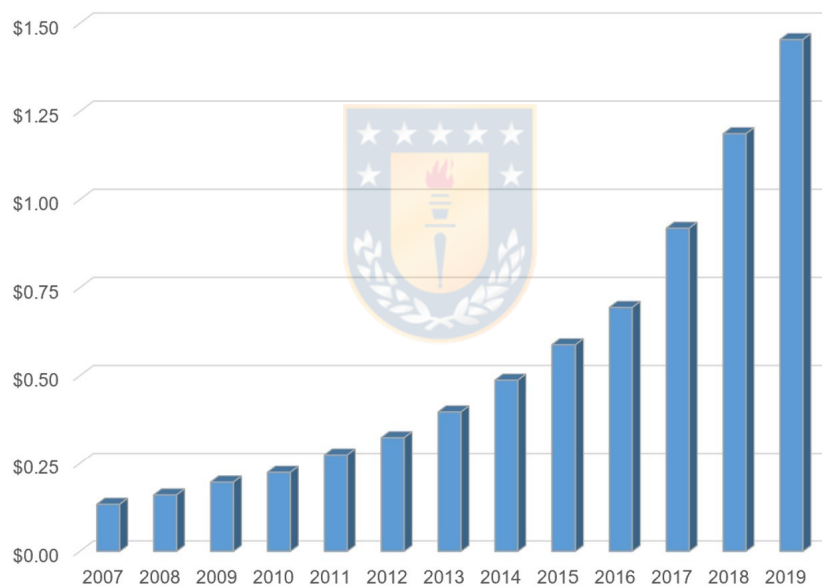


Figura 1.1: Costo anual de producción de piezas finales mediante la manufactura aditiva en todo el mundo. Los valores están en miles de millones de dólares. Gráfico obtenido de [Wholers et al., 2020]

Actualmente, es posible encontrar diversas tecnologías de impresión 3D que varían en precios, tamaños, materiales, etc. La manufactura aditiva se ha vuelto un proceso de manufactura importante para muchas industrias, cuyos principales usos son la fabricación de prototipos, herramientas, e incluso piezas finales. Por ejemplo, la marca de automóviles BMW anunció en noviembre del 2020 que ha creado un millón de piezas impresas en 3D desde el año 2010 [Andrade, 2018]. Piezas que como ellos comentan, se utilizan en distintos modelos de automóviles de la marca.

Pero si bien la manufactura aditiva permite crear geometrías complejas, esta no está exenta de restricciones. Uno de los problemas que presenta es debido al propio proceso del material añadido, ya que, sin un soporte mecánico el material no podría ser posicionado en la parte de

interés. Esto dificulta la impresión de partes sobresalientes porque no existe una estructura que soporte la adición de las siguientes capas [Vanek et al., 2014]. Ante este problema existen 2 soluciones, modificar la geometría u orientación de la pieza para que no presenten partes sobresalientes que no se puedan imprimir, o utilizar estructuras que actúen como soportes tal como se muestra en color rojo en la Figura 1.2.

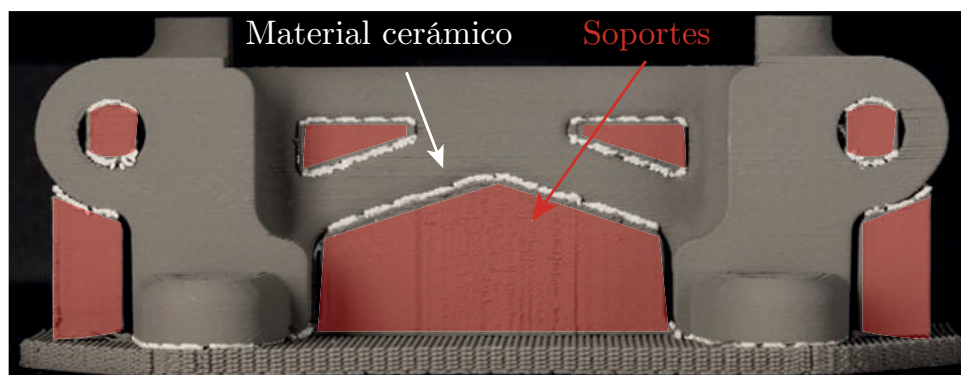


Figura 1.2: Pieza de metal fabricada con manufactura aditiva. En rojo se muestran los soportes utilizados para fabricar la pieza, mientras que el material blanco corresponde al material cerámico que se encuentra entre los soportes y la pieza. Imagen modificada de [DesktopMetal, 2020]

Cuando no es posible modificar la geometría de la pieza y no existe una orientación elimine el uso de soportes, se tiene que recurrir a soportes estructurales. Estos soportes también podrían ser necesarios para introducir cierta conductividad térmica [Kuo et al., 2018, Zhou et al., 2019] para prevenir problemas como el pandeo o los esfuerzos residuales y evitan el colapso de la pieza [Eduardo Fernández, 2020]. A pesar de los beneficios de los soportes estructurales, estas estructuras implican una mayor cantidad de material y tiempo de impresión [Vanek et al., 2014]. Además, una vez fabricada la pieza, estos soportes deben ser removidos, muchas veces mediante maquinaado, lo que agrega una dificultad y costo adicional al proceso de fabricación.

Dado que las estructuras soportes no forman parte de la pieza final, representan un gaste de material. Existen diferentes formas de reducir la cantidad de material que utilizan estos soportes de sacrificio. Por ejemplo, se puede encontrar la orientación de la pieza que reduzca la cantidad de soportes necesarios [Alexander et al., 1998]. Muchas impresoras usan diferentes perfiles de relleno que utilizan menos material en los soportes, como por ejemplo estructuras celulares [Strano et al., 2013]. Otra opción es la de generar soportes con geometrías optimizadas que ocupen el menos material posible sin comprometer el proceso de impresión. Este método se encuentra implementado en algunos programas como [Autodesk, 2020, Vanek et al., 2014, Feng et al.,], los que generan soportes como se muestra en la Figura 1.3. Sin embargo, la mayoría de los métodos para generar soportes eficientes están basados en simple geometría [Chen et al., 2013], no tienen un significado óptimo del punto de vista mecánico [Mezzadri et al., 2018]. Otra alternativa para generar soportes eficientes es la optimización topológica.

La optimización topológica (abreviado TO por el inglés *Topology Optimization*) es un método matemático que aborda uno de los aspectos del diseño estructural. Concretamente la optimización topológica de estructuras sólidas implica la determinación de características tales como la cantidad, localización y forma de los agujeros como también la conectividad de estos agujeros dentro de un espacio de diseño dado [Bendsoe and Sigmund, 2013]. Este método

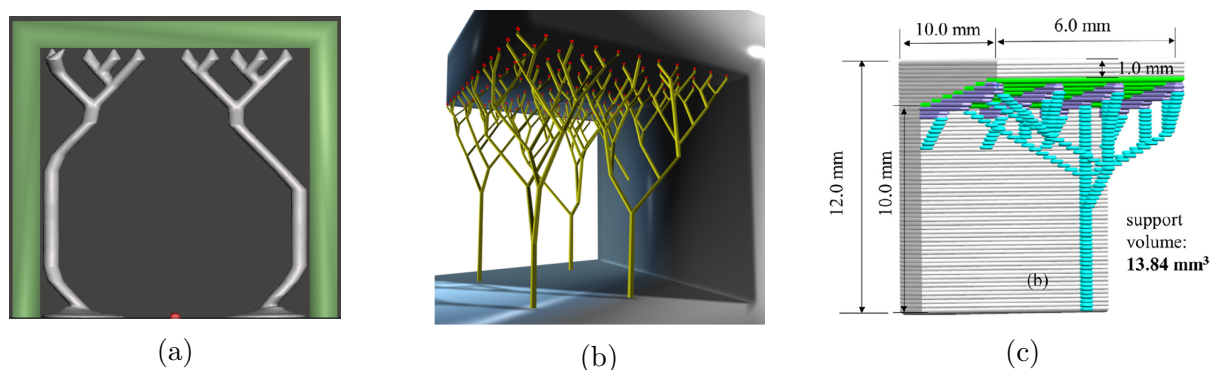


Figura 1.3: En (a) soportes generados por el software Meshmixer [Autodesk, 2020]. En (b) soportes generados en el trabajo de [Vanek et al., 2014]. En (c) soportes generados en el trabajo de [Feng et al.,].

presenta el problema de diseño como un problema de optimización numérica, donde se maximiza algún criterio de rendimiento modificando iterativamente la disposición del material [Eduardo Fernández, 2020].

Ejemplo de geometrías optimizadas con TO se muestran en la Figura 1.4, donde se presenta una imagen renderizada de estructuras de anclaje que une el estanque de combustible a la carcasa de un motor de avión. Se puede apreciar que las geometrías de la Figura 1.4 son bastantes complejas y por ende, podrían ser difíciles de fabricar mediante procesos de manufactura convencionales. Sin embargo, estas geometrías no presentan grandes desafíos para la manufactura aditiva y por ello el gran interés industrial de combinar la optimización topológica con la manufactura aditiva.



Figura 1.4: Optimización topológica con control de escala de longitud de estructuras de anclaje para un estanque de combustible de un avión. Imagen obtenida de [Eduardo Fernández, 2020].

La gran libertad de forma que logra la manufactura aditiva es muchas veces gracias al material de sacrificio, como se aprecia en la Figura 1.5b. A pesar de lograr la pieza final, el material de soporte eleva los costos y tiempos de producción y reduce la eficiencia de la manufactura aditiva.

Los software de las diferentes compañías de impresora 3D poseen su propio algoritmo para generar soportes, los cuales, utilizan los métodos convencionales que se mencionaron anteriormente y son bastante eficientes. Sin embargo, esta eficiencia puede ser igualada o mejorada

Tabla 1.1: Comparación de tiempo y material utilizado entre soportes generados con el software Cura y los soportes generados con TO.

Pieza impresa	Masa utilizada	Tiempo de impresión	Reducción de masa con TO
Puente rectangular (Cura)	8 g	6 h 45 min	-
Puente rectangular (TO)	7 g	6 h 26 min	12.5 (%)
Puente circular (Cura)	9 g	7 h 43 min	-
Puente circular (TO)	8 g	7 h 45 min	11.1 (%)
Puente triangular (Cura)	6 g	4 h 32 min	-
Puente triangular (TO)	5 g	4 h 57 min	16.7 (%)
P. triangular invertido (Cura)	11 g	8 h 25 min	-
P. triangular invertido (TO)	9 g	7 h 28 min	18.2 (%)

utilizando optimización topológica como se muestra en la Tabla 1.1. En esta se puede observar que es posible reducir la cantidad de material utilizado entre un 10% y 20% en comparación con los soportes generados por el software Cura de la compañía Ultimaker.

Este trabajo busca reducir el gasto de material asociado a los soportes de sacrificio. Esto se logra haciendo uso de la optimización topológica en la zona donde se espera que los soportes estructurales sean requeridos, como se muestra en la Figura 1.6. Este trabajo asume que la pieza a ser fabricada por manufactura aditiva no puede ser modificada ni rotada, por lo que el uso de material de soporte es obligatorio.

El problema de optimización topológica es formulado según [Eduardo Fernández, 2020]. Es decir, el problema de optimización topológica maximiza la rigidez de los soportes y permite controlar la geometría de estos. Este trabajo considera una impresora 3D Ultimaker S2⁺, está limitado a la optimización de piezas en 2D, y analiza el desempeño de los soportes según la geometría impuesta en la optimización topológica (ver Figura 1.6).

1.1 Hipótesis

La hipótesis que sustenta el desarrollo de este trabajo es:

- El uso de la optimización topológica con control de tamaño permite generar soportes eficientes y fáciles de remover cuando el tamaño impuesto sigue las pautas geométricas de cierta impresora 3D.

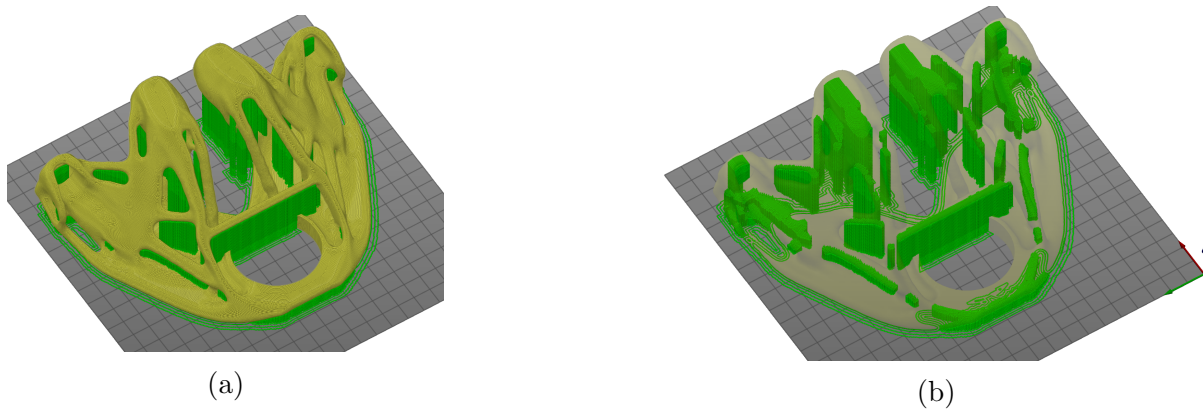


Figura 1.5: Las imágenes muestran en color verde el material de soporte necesario para imprimir la pieza central de la Figura 1.4. (a) muestra la pieza y los soportes, mientras que (b) muestra los soportes y la pieza traslúcida. Imágenes obtenidas de [Eduardo Fernández, 2020].

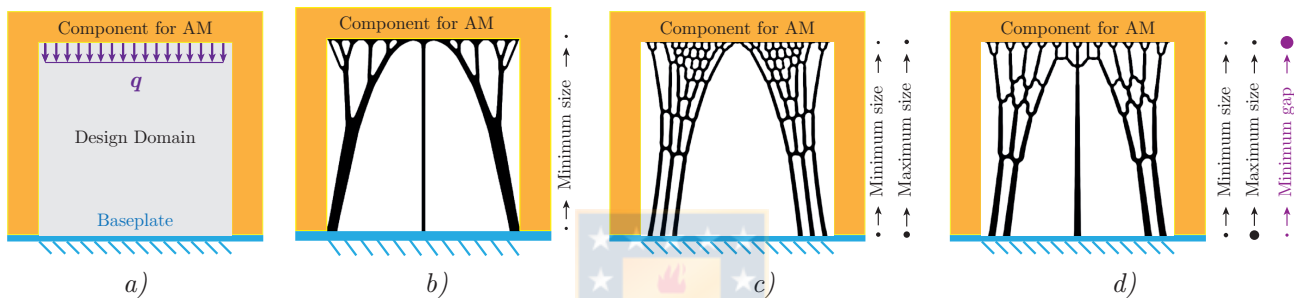


Figura 1.6: Soportes generados con optimización topológica utilizando diferentes restricciones de la manufactura aditiva.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El Objetivo General (OG) de este trabajo es:

- OG1: Usar la optimización topológica para generar soportes eficientes que usen poco material y sean capaces de sostener la estructura que se desea fabricar por manufactura aditiva (Impresora 3D).

1.2.2 Objetivos específicos

Los Objetivos Específicos (OE) de este trabajo son:

- OE1: Identificar de forma experimental las pautas geométricas asociadas a una impresora 3D (Ultimaker S2+) para ser usadas en la optimización topológica.
- OE2: Analizar el desempeño de soportes generados por la optimización topológica con control tamaño, el cual es definido en base a las pautas geométricas recopiladas.

- OE3: Validar la metodología propuesta considerando varios escenarios donde las estructuras soporte podrían ser requeridos.
- OE4: Fabricar las estructuras generadas utilizando la impresora 3D para demostrar la imprimibilidad de los soportes.


1.3 Metodología

La metodología de este trabajo consiste en identificar las pautas geométricas representativas de una impresora 3D, incorporar dichas pautas como restricciones en el problema de optimización topológica, y analizar el desempeño de soportes generados con la optimización topológica retroalimentada con pautas de impresión 3D. Esta metodología es detallada a continuación.

1.3.1 Identificación de pautas geométricas

Para verificar las pautas geométricas de la manufactura aditiva para la impresora 3D que se muestra en la Tabla 1.2, se imprimen las geometrías que se observan en la segunda columna de las Tablas 4.1 y 4.3 en la impresora 3D. Las cuales, permitan obtener el valor de estas pautas geométricas de forma subjetiva y cualitativa, de esta manera, las pautas geométricas se obtienen de forma experimental.

Tabla 1.2: Tecnologías de impresión 3D.

Modelo, Marca	Tecnología de impresión	Imagen
Ultimaker S2 ⁺ , Ultimaker	Fused Deposition Modelling (FDM)	

1.3.2 Analizar los distintos soportes generados según los parámetros utilizados

En la optimización topológica se deben manejar varios parámetros como las condiciones de borde, el espacio de diseño, el radio del filtro utilizado, como también las restricciones que se incorporan en la optimización del problema. Cada una de estas restricciones y parámetros afecta en el diseño final de los soportes. Por tal motivo, se analiza la influencia de estos parámetros y restricciones de la optimización en los diseños obtenidos.

1.3.3 Diseñar soportes utilizando la optimización topológica con control de escala de longitud

Una vez analizado el desempeño de los soportes obtenidos según los parámetros de optimización, se compara el método propuesto con casos de referencia presentes en la literatura. Específicamente, se generan los soportes para los 4 casos de estudio que se muestran en la Figura 1.7.

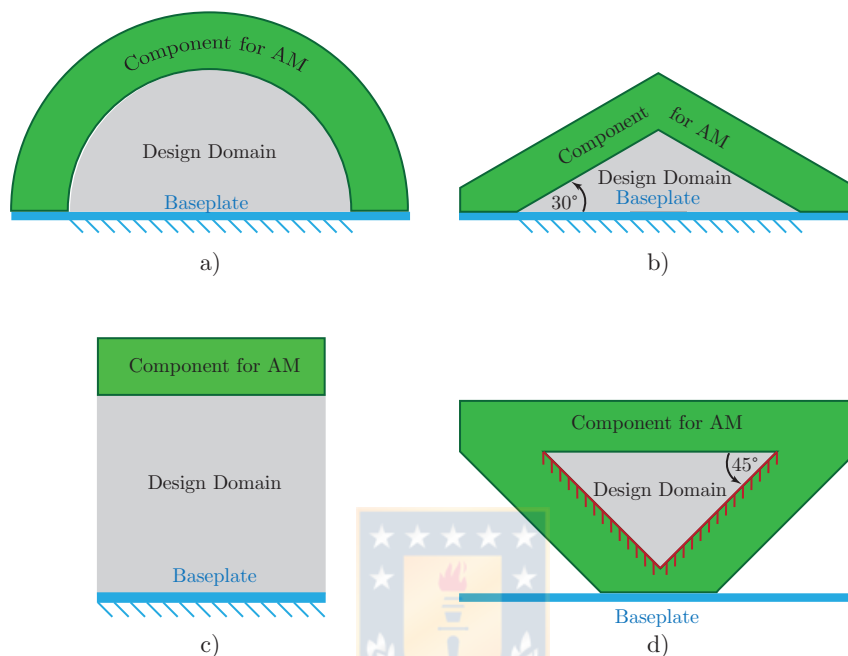


Figura 1.7: Casos considerados para evaluar la optimización topológica propuesta para generar soportes destinados para la manufactura aditiva.

1.3.4 Imprimir los soportes estructurales generados con optimización topológica

Para demostrar que la metodología propuesta puede ser una alternativa a los tradicionales métodos geométricos, se imprimen los soportes generados para diferentes piezas para evaluar la manufacturabilidad de estas estructuras como se muestra en la Figura 1.8.

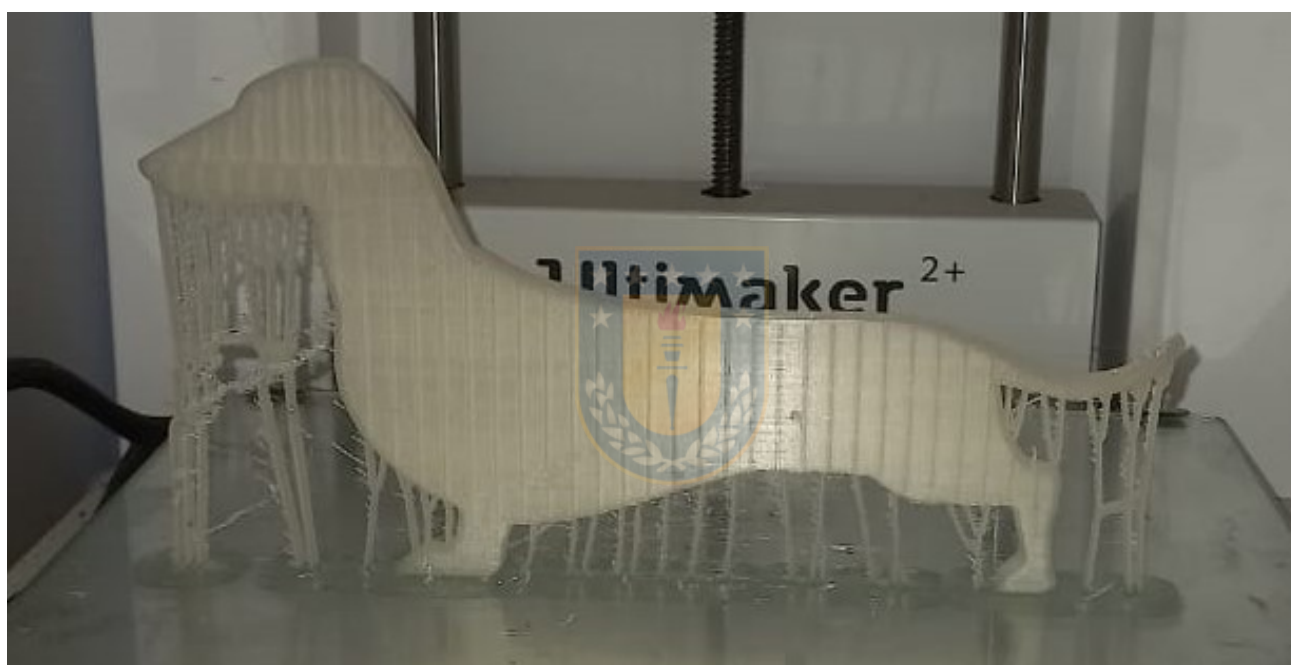


Figura 1.8: Impresión 3D de los soportes estructurales.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1 Optimización topológica

La optimización topológica es un método matemático que busca la óptima distribución de material dentro de un espacio de diseño. El método presenta el problema de distribución de material como un problema de optimización numérica, donde cierto criterio de desempeño mecánico es optimizado mediante iterativas modificaciones de la disposición de material dentro del dominio de diseño [Bendsoe and Kikuchi, 1988]. El proceso iterativo se ilustra en la Figura 2.1, donde se optimiza la distribución de material (topología) de una viga en voladizo.

2.1.1 Formulación del problema de optimización topológica

Convencionalmente los métodos de optimización topológica usan el método de elementos finitos para evaluar el desempeño del diseño y determinar la distribución de material óptima dentro del espacio de diseño dado.

Principalmente, existen dos enfoques para plantear el problema de optimización topológica, el enfoque de densidades y el enfoque de curvas de nivel (level set). El enfoque de densidades, el cual se usa en este trabajo, consiste en asignar a cada elemento finito una variable de diseño llamada densidad que va de 0 a 1. La variable de densidad define la masa del elemento finito y su rigidez mediante una penalización del módulo de Young, como se muestra en la Figura 2.2. Para lograr visualizar las geometrías que se obtienen en cada iteración se le asigna un color a cada elemento según la densidad que este posea. En donde un elemento sin densidad (vacío) aparecerá en blanco, mientras un elemento completamente sólido aparecerá en negro. A Las

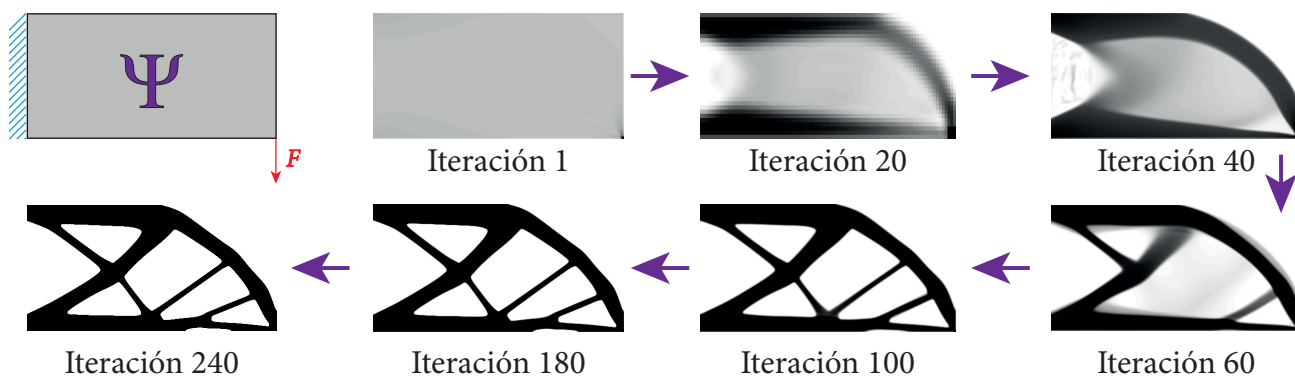


Figura 2.1: Minimización de la flexibilidad de una viga en voladizo utilizando un enfoque de densidades.

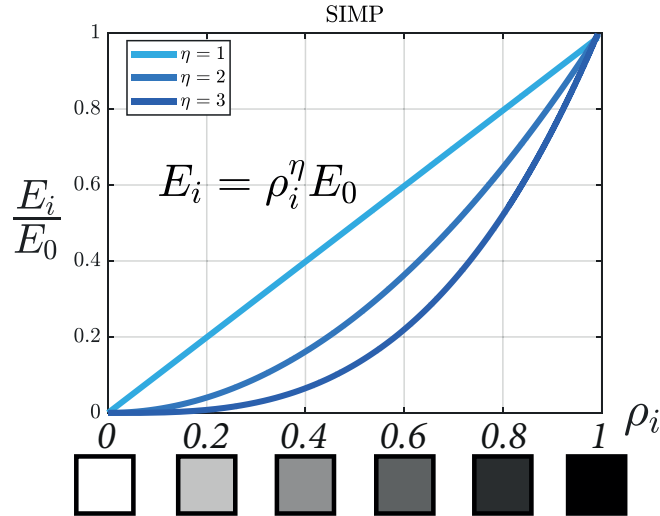


Figura 2.2: Interpolación utilizada para el enfoque de densidades.

densidades intermedias se le asigna un color en escala de grises según el valor de su densidad, como se observa en la Figura 2.2.

La interpolación mostrada en la ecuación 2.2 se denomina SIMP (Solid Isotropic Method with Penalization), donde el exponente η es el parámetro de penalización, que cuando toma valores mayores que 1 permite reducir la cantidad de densidades intermedias [Bendsøe, 1989].

Clásicamente, el problema de optimización topológica consiste en minimizar el trabajo de las fuerzas externas (minimizar la flexibilidad), o equivalentemente, consiste en maximizar la rigidez de la estructura [Bendsoe and Kikuchi, 1988]. Matemáticamente, el problema de optimización topológica se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
 \min_{\rho} \quad & \mathbf{f}^T \mathbf{u} \\
 \text{s.t.:} \quad & V = \sum_{i=1}^N \rho_i v_i \leq V^* \\
 & \rho_{min} \leq \rho_i \leq 1 \quad , \quad i = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde v_i representa el volumen de cada elemento finito, \mathbf{f} es el vector que contiene las fuerzas externas y \mathbf{u} el vector que contiene los desplazamiento nodales, ρ_i es la densidad de cada elemento y N la cantidad total de elementos. Los desplazamientos nodales " \mathbf{u} " son obtenidos al resolver la ecuación de equilibrio $\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}$. Donde \mathbf{K} es la rigidez global del sistema, obtenida al ensamblar las matrices de rigidez elemental k_i . Considerando un material elástico e isotrópico, el módulo de Young de cada elemento finito es penalizado por las variables de diseño como sigue:

$$E_i = \rho_i^\eta E_0 \quad , \quad i = 1, \dots, N \tag{2.2}$$

Sin embargo, si se resuelve el problema tal como se ha mencionado hasta ahora, aparecerán ciertas inestabilidades geométricas, como patrones de tablero de ajedrez (dos elementos unidos

por un solo nodo, ver Figura 2.4a), una gran cantidad de elementos finitos con densidades intermedias que no poseen sentido físico (ver Figura 2.4a), y una dependencia de la malla de elementos finitos (diferentes discretizaciones llevan a distintos resultados, ver Figura 2.4) [Sigmund and Petersson, 1998]. Una de las herramientas que evitan dichos problemas es el uso de un filtro, similar a los utilizados en técnicas de procesamiento de imágenes. En tales filtros, el color de un pixel se obtiene como la suma ponderada de los colores vecinos, lo que difumina la imagen, como se muestra en la Figura 2.3. Cuando este filtro es aplicado sobre las densidades que definen a cada elemento del dominio de diseño, se logra resolver los problemas de tablero de ajedrez y dependencia de la malla.



Figura 2.3: En (a) foto original de mi mascota Nala. En (b) imagen obtenida al aplicar un filtro con kernel gaussiano. En (c) imagen obtenida al aplicar el mismo filtro con un radio mayor.

A pesar de las soluciones entregadas por el filtro de densidad, al final del proceso sigue habiendo una cantidad considerable de densidades intermedias. Para resolver este problema, las densidades intermedias son proyectadas hacia 0 o 1. Esto se hace con funciones escalonadas, como se muestra en la Figura 2.5. Mientras mayor sea la pendiente del escalón, menor cantidad de densidades intermedias son obtenidas, pero se aumenta la no-linealidad del problema de optimización [Guest et al., 2004].

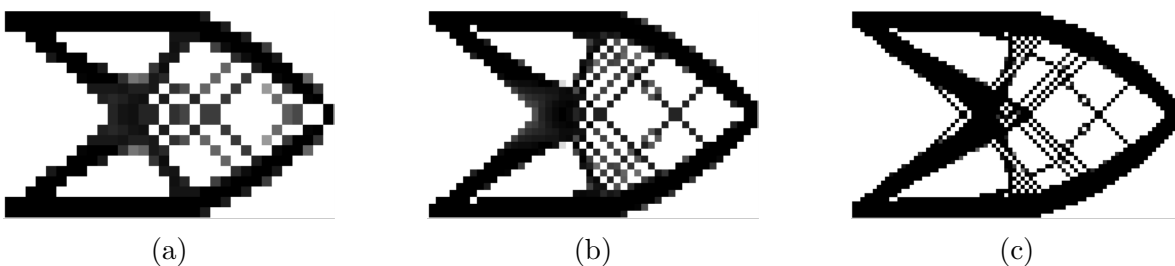


Figura 2.4: Minimización de flexibilidad de una viga en voladizo utilizando diferentes discretizaciones. De izquierda a derechas, $N_{el} = 640$, $N_{el} = 1440$ y $N_{el} = 4000$. Imagen obtenida de [Eduardo Fernández, 2020]

Las 2 técnicas numéricas, es decir, el filtro de densidad, y la proyección de escalón, producen 3 campos de densidades. La primera es el campo de las variables filtradas, y el tercero es el campo de las variables proyectadas. Es por ello que este esquema es conocido como el esquema de 3 campos en la optimización topológica [Sigmund and Maute, 2013].

A pesar de que la optimización topológica y el esquema de tres campos permiten obtener diseños nítidos y de alto desempeño mecánico, las geometrías que normalmente se obtienen son bastante complejas para fabricar con métodos convencionales, por lo que, normalmente solo se utilizan como fuente de inspiración al momento de diseñar componentes mecánicos.

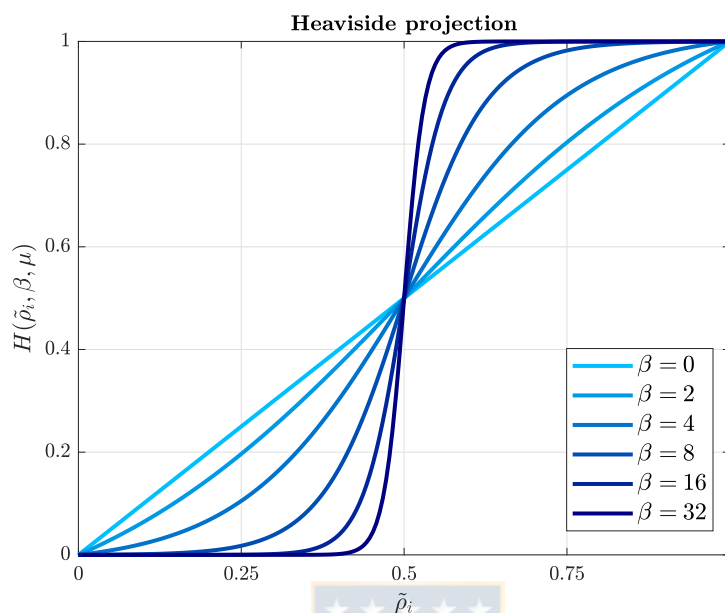


Figura 2.5: Función escalonada cuya pendiente es controlada por un parámetro β .

Por esto último, se han realizados grandes esfuerzos para restringir los métodos de optimización topológica siguiendo un conjunto de pautas geométricas definidas para el proceso de manufactura que se desee utilizar. Uno de estos procesos de fabricación es la manufactura aditiva, cuya popularidad ha aumentado bastante últimamente y se ha utilizado en varias áreas de la mecánica por su capacidad de fabricar piezas con geometrías complejas y de forma rápida comparada con otros métodos convencionales. Por tal motivo, muchos investigadores se han centrado en restringir los modelos de optimización topológica de acuerdo a ciertas pautas geométricas obtenidas de la manufactura aditiva.

2.2 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva es el proceso de fabricar piezas tridimensionales a través de la adición de material capa por capa. El proceso de impresión 3D fabrica piezas u objetos que normalmente son diseñados a través del Diseño Asistido por Computador (CAD, por sus siglas en inglés). Hoy en día existen una gran cantidad de tecnologías de impresión 3D y materiales que se pueden utilizar en la manufactura aditiva, desde plásticos baratos hasta ciertos tipos de metales como titanio [Duda and Raghavan, 2016].

Muchas veces esta tecnología esta asociada a juguetes o hobbies, pero últimamente sus aplicaciones se han extendido a proyectos académicos como también la fabricación de piezas para una gran variedad de industrias tales como industrias manufactureras, industrias aeroespaciales, e

industria energética. Cuyos usos más comunes son la fabricación de prototipos, herramientas, e incluso la fabricación de piezas finales.

2.2.1 Como imprimir una pieza 3D

Comúnmente los pasos a seguir para imprimir una pieza 3D son los siguientes:

1. Diseñar una pieza 3D en formato CAD en cualquier software como Inventor, Catia, Solidworks, etc (en este proyecto los diseños optimizados se realizan en Matlab).
2. Exportar el archivo a formato STL (Standard Triangle Language).
3. Rebanar el modelo para generar las capas bi-dimensionales y los respectivos códigos G. Comúnmente estos programas son llamados Slicer.
4. Configurar los distintos parámetros de impresión 3D como el material, orientación, porcentaje de relleno, etc.
5. Comenzar la deposición de material capa a capa. Proceso conocido por impresión 3D.
6. Si es necesario, realizar un post-procesamiento a la pieza, ejemplo, remover los soportes.

2.2.2 Tecnologías de impresión 3D

Existen diferentes tecnologías de impresión 3D, en este trabajo se utiliza la impresora Ultimaker s2⁺, la cual, utiliza la tecnología FDM, también conocida como FFF (Fused Filament Fabrication), es la tecnología de manufactura aditiva más conocida debido a la gran variedad de precios, tamaños y materiales que se pueden utilizar. El proceso consiste en calentar un termoplástico a una temperatura que permita extruir el material a través de la boquilla de la impresora. La pieza se fabrica depositando el material capa por capa como se muestra en la Figura 2.6.

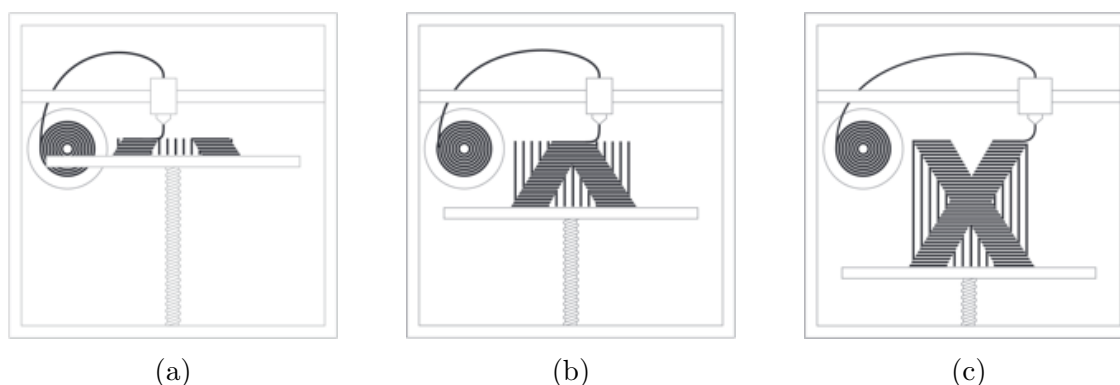


Figura 2.6: Esquema del proceso de fabricación a través de FDM. Imagen obtenida de [Markforged, 2020].

2.2.3 Software de impresión 3D

Tal como se mencionó anteriormente, la mayoría de las marcas de impresoras 3D poseen su propio software Slicer, pero en general todos siguen el mismo procedimiento.

Convertir a formato STL

Dependiendo del software que se utilice para el diseño de la pieza existen diferentes formas de convertir un archivo a STL. La forma más común es diseñar la pieza en un software CAD, ya que, la mayoría de los software CAD pueden convertir el archivo CAD a formato STL, las diferencias entre estos 2 tipos de formato se pueden observar en la Figura 2.7. Dado que en este trabajo se usa la optimización topológica, donde la geometría queda descrita por una imagen en escala de grises, se hace uso del programa creado por [Liu, 2021], el cual genera un archivo STL a partir de una imagen en escala de grises.

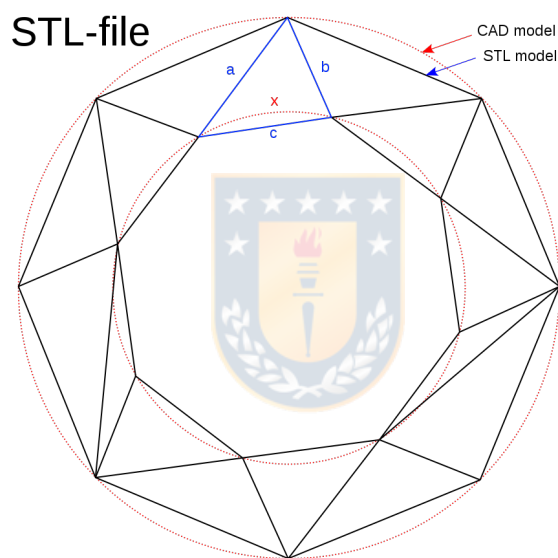


Figura 2.7: Diferencia entre archivo CAD y STL. Imagen obtenida de [Van Lieshout, 2020].

Calidad de la malla

Dependiendo de la aplicación se debe elegir bien el tamaño de los triángulos de la malla del archivo STL, las diferencias entre la calidad de la malla según la densidad de triángulos que posea el archivo se puede observar en la Figura 2.8. Hay que tener en cuenta que al utilizar una mayor cantidad de triángulos significa archivos más pesados y por ende más difíciles de manejar en los software de impresión 3D.

Ensamblar piezas

Muchas veces los objetos diseñados corresponden a un ensamblaje de diferentes piezas. Para evitar problemas es recomendable imprimir estas piezas por separado y luego ensamblarlas. Sin

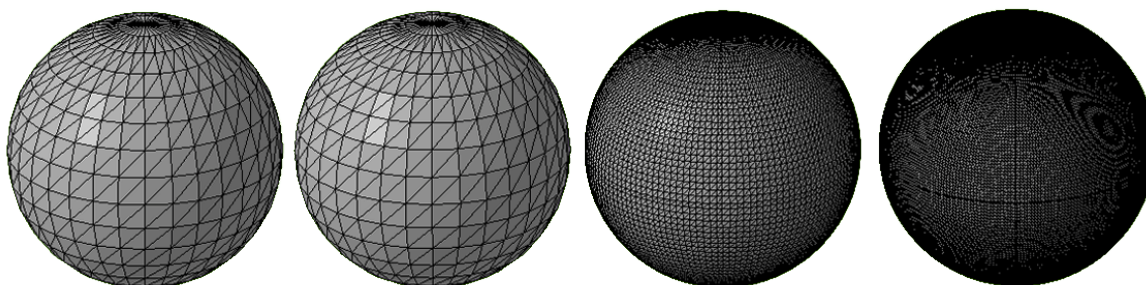


Figura 2.8: Diferentes calidades de malla. Imagen obtenida de [Markforged, 2020].

embargo, para este proyecto es al revés, ya que los soportes son obtenidos de Matlab, y la pieza que se desea fabricar y que utilizará los soportes están diseñados en Inventor. La manera en que se ensamblan los soportes a las piezas es a través del software Meshmixer [Autodesk, 2020], el cual, permite manejar las piezas en formato STL, logrando ensamblar las piezas de manera sencilla como se muestra en la Figura 2.9.

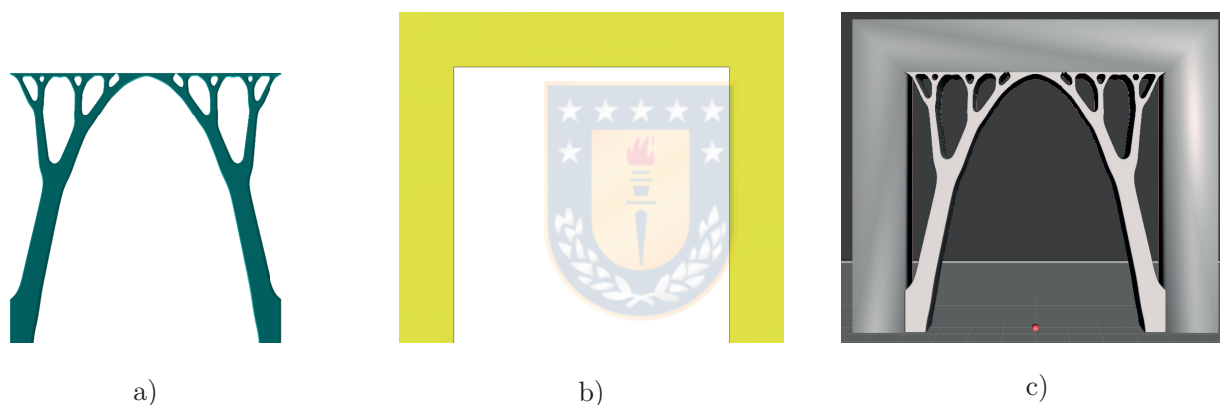


Figura 2.9: Ensamblaje soporte-pieza. En (a) soportes optimizados en Matlab convertidos a formato STL. En (b) pieza diseñada en Inventor que se busca imprimir. En (c) ensamblaje de los soportes con la pieza utilizando el software Meshmixer.

Slicing

Una vez listo el archivo STL que se desea imprimir, se debe generar el código G a través de un software Slicer. En este proyecto se utiliza el software Cura de Ultimaker [Ultimaker, 2020] que se muestra en la Figura 2.10, en el cual se pueden manejar ciertos parámetros de impresión como los que se muestran a continuación.

Grosor de las capas

Uno de los parámetros importante de las impresoras 3D es el grosor de las capas, ya que esta tiene un efecto importante en la calidad de la superficie de la pieza como se muestra en la Figura 2.11, especialmente, cuando la pieza tiene superficies curvas.

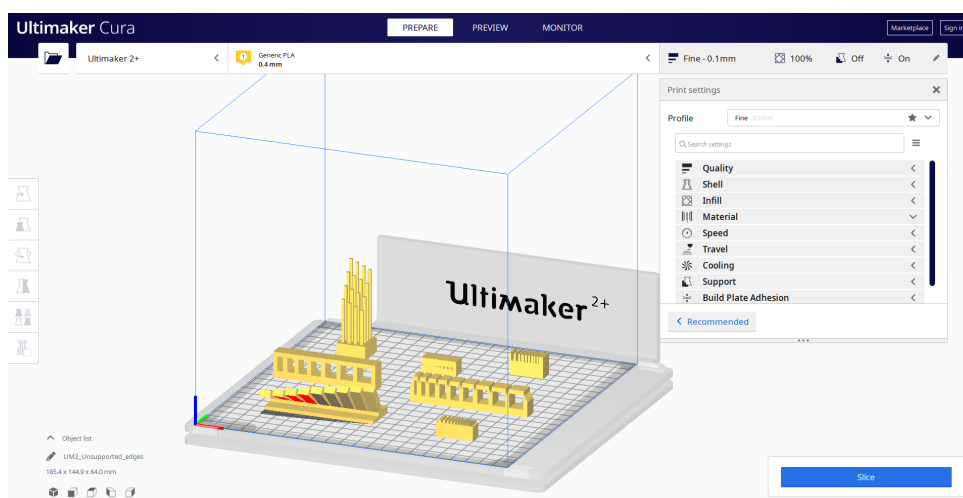


Figura 2.10: Software Cura de Ultimaker.

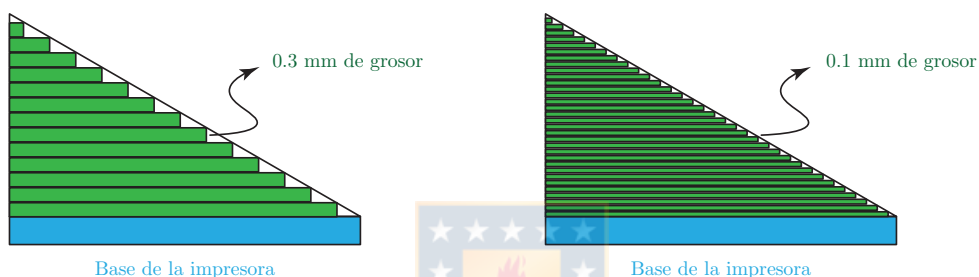


Figura 2.11: Diferencias de grosor de capa.

Orientación de la pieza

Como se mencionó anteriormente, una pieza necesita el uso de estructuras de soportes cuando posee partes sobresalientes. Sin embargo, estos soportes se puede evitar o reducir si se escoge la orientación adecuada de la pieza como se muestra en la Figura 2.12. La mayoría de los software permiten buscar la orientación adecuada que reduce el uso de soportes o los evita, este procedimiento se puede realizar como se explica en [Alexander et al., 1998].

Relleno de la pieza

Al imprimir piezas 3D muchas de estas son huecas, pero poseen un relleno con forma celular, según el porcentaje y tipo de rellenos pueden variar ciertas características como la densidad de la pieza, tiempo de impresión, cantidad de material utilizado o su resistencia mecánica. Ejemplos de porcentajes de relleno y patrones geométricos utilizados en los rellenos se muestran en la Figura 2.13.

2.2.4 Materiales de impresión 3D

Los materiales que se pueden utilizar para imprimir piezas 3D dependen de la tecnología de impresión y el modelo de impresora 3D que se utilice. En este trabajo se utiliza la impresora

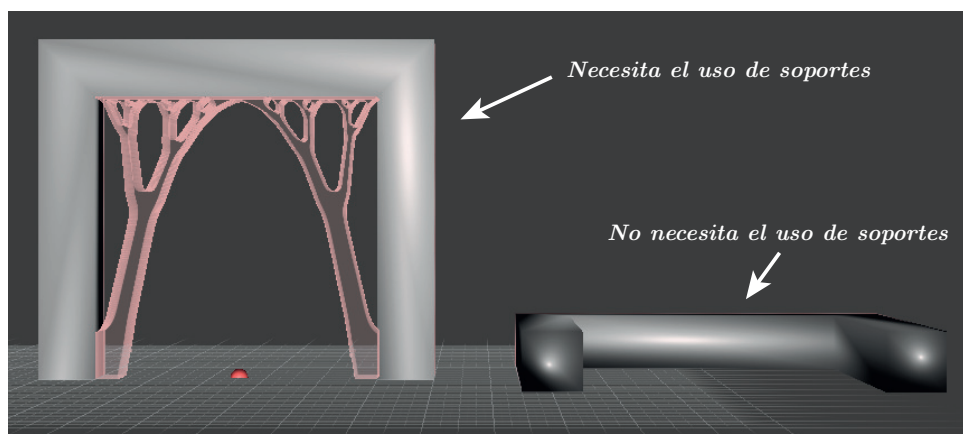


Figura 2.12: Orientación que puede tomar la pieza en el proceso de impresión 3D.

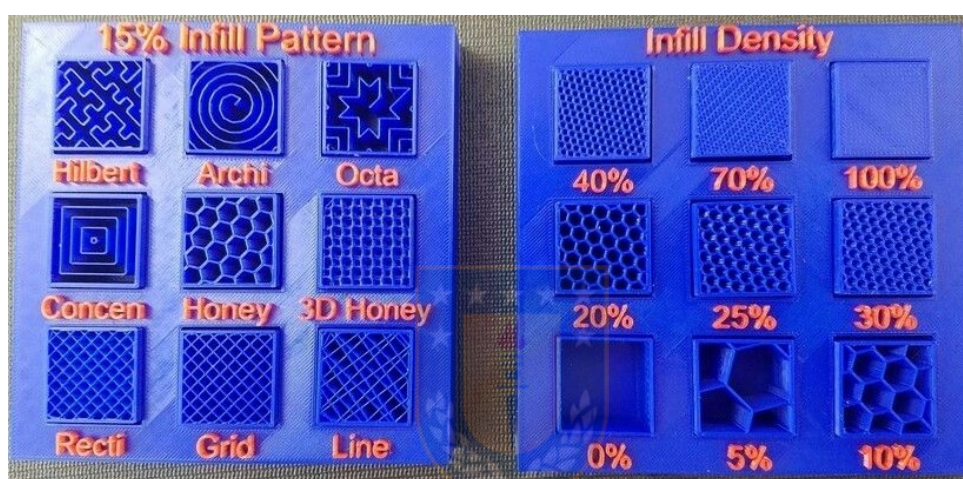


Figura 2.13: Diferentes porcentajes y tipos de relleno. Imagen obtenida de [Siber, 2018]

Ultimaker S2⁺, la cual, utiliza la tecnología FDM, por lo tanto, se pueden utilizar una variedad de materiales termoplásticos que vengan en formato de filamento. Los materiales más utilizados en este tipo de tecnologías son los que se muestran en la Figura 2.14.

2.2.5 Partes de la impresora 3D

Las partes más importantes de una impresora 3D que utilice la tecnología FDM se muestran en la Figura 2.15 y son las siguientes:

Cabezal de la impresora

El cabezal es el encargado de calentar el filamento de termoplástico y extruirlo a través de la boquilla sobre la base de la impresora para imprimir la pieza.

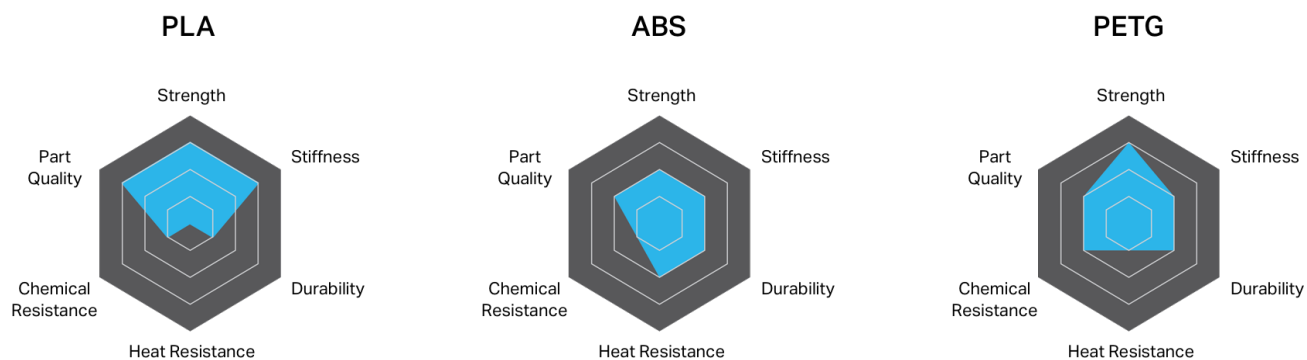


Figura 2.14: Propiedades de los distintos termoplásticos que se pueden utilizar en impresoras con tecnología FDM. Imágenes obtenidas de [Markforged, 2020].

Base de la impresora y sistema de movimiento en Z

Corresponde a la base donde se imprime la pieza y en general se puede mover en la dirección normal a la base de la impresora para moverse luego de imprimir una capa.

Sistema de movimiento XY

Es el sistema encargado de mover el cabezal en el plano de la base de la impresora de manera de seguir el camino de impresión para fabricar la pieza.

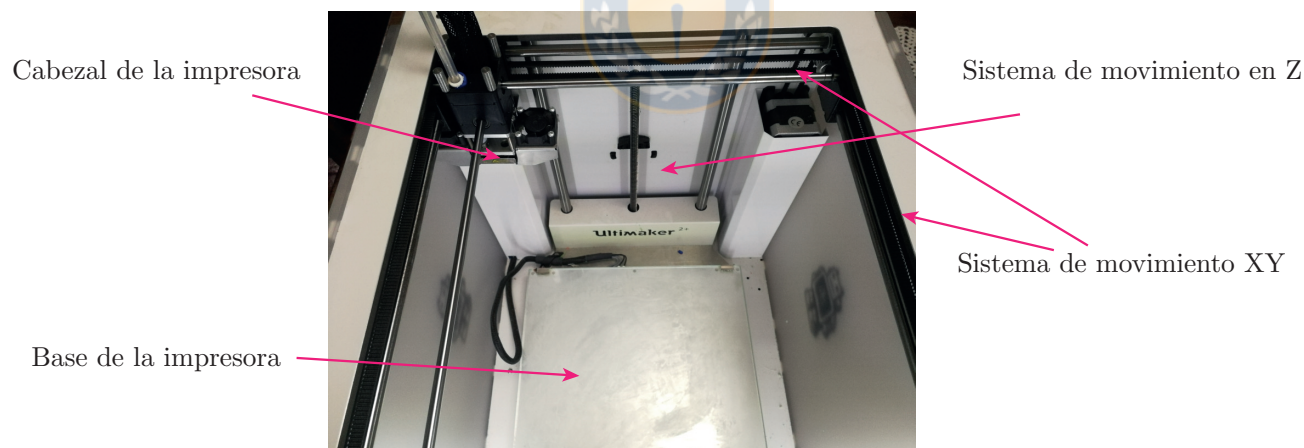


Figura 2.15: Partes más importantes de una impresora 3D. Foto de la impresora Ultimaker s2⁺.

CAPÍTULO 3

Formulación del problema de optimización topológica

Este trabajo adopta el enfoque de densidad para plantear el problema de distribución de material. Como se mencionó anteriormente, el método asocia una variable de diseño, denominada densidad, que penaliza la masa y rigidez del elemento finito al que se asocia. A pesar de ser uno de los primeros métodos para plantear el problema de optimización topológica, existen una serie de singularidades geométricas en el método de la densidad. Este inconveniente es abordado a través de técnicas de filtrado en este trabajo. En específico, se usa un esquema conocido como esquema de tres campos. Junto con este esquema, se adopta una formulación robusta con respecto a errores de manufactura, ya que esta permite además controlar con precisión el tamaño mínimo de las cavidades y de las partes sólidas [Sigmund, 2009].

Antes de presentar el esquema robusto propuesto por Sigmund, se presenta el esquema de tres campos.

3.1 Esquema de tres campos

El nombre del esquema de tres campos se debe a que la formulación comprende tres campos de densidad. El primer campo corresponde a las variables de diseño, el cual se denota por ρ . El segundo campo corresponde al campo filtrado, el cual es denotado por $\tilde{\rho}$. Por último, el tercer campo, denotado por $\bar{\rho}$, corresponde a la proyección del campo filtrado, es decir $\bar{\rho}(\tilde{\rho}(\rho))$. De esta manera, el problema de optimización topológica no es dependiente de la malla de elementos finitos, los patrones de tablero de ajedrez, y poseen una baja cantidad de densidades intermedias.

3.1.1 Campo filtrado

El campo $\tilde{\rho}$ se obtiene mediante un proceso de filtrado que define a cada $\tilde{\rho}_i$ como un promedio ponderado de las densidades que están dentro de una circunferencia de radio r_{fil} como se muestra en la Figura 3.1a. De esta manera, la variable filtrada $\tilde{\rho}_i$ se obtiene de la siguiente manera.

$$\tilde{\rho}_i = \frac{\sum_{j=1}^N \rho_j v_j w(x_i, x_j)}{\sum_{j=1}^N v_j w(x_i, x_j)} \quad (3.1)$$

donde $w(x_i, x_j)$ corresponde al peso de ponderación de la variable de diseño ρ_j en la definición

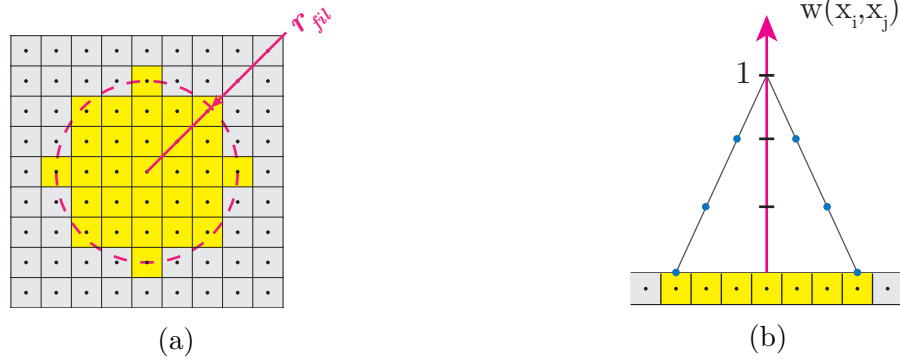


Figura 3.1: En a) Región abarcada por un filtro con un radio de 3 elementos. En b) función peso de las densidades de los elementos vecinos.

de $\tilde{\rho}_i$. La función $w(x_i, x_j)$ pondera con valor 1 la variable central, mientras que la ponderación de las otras variables es decreciente respecto a la variable central, como se muestra en la Figura 3.1b. Matemáticamente, la función de ponderación se define como en la ecuación 3.2, donde x_i y x_j representan la coordenada del centroide del elemento finito y r_{fil} el radio del filtro, como se muestra en la Figura 3.1a.

$$w(x_i, x_j) = \max \left(0, 1 - \frac{\|x_i - x_j\|}{r_{\text{fil}}} \right) \quad (3.2)$$

Los valores de los pesos ponderados de cada elemento son pre-almacenados en la matriz \mathbf{D} como se muestra a continuación:

$$\mathbf{D}_{i,j} = \frac{v_j w(x_i, x_j)}{\sum_{j=1}^N v_j w(x_i, x_j)} \quad (3.3)$$

Esta matriz $\mathbf{D}_{i,j}$ permite obtener el campo filtrado con la simple operación:

$$\tilde{\rho} = \mathbf{D}\rho \quad (3.4)$$

Bajo el esquema de tres campos, el tamaño mínimo de las cavidades y de las partes sólidas estructurales queda definido en función del tamaño de la región de filtrado r_{fil} . Debido a esto, la región de filtrado debe ser modificada en los bordes del dominio de diseño, de lo contrario la región circular sería cortada por los bordes y representaría una fracción del tamaño original, lo que reduce el tamaño mínimo deseado. Una estrategia que corrige esto, y que es adoptada en este trabajo, consiste en extender el dominio de diseño usando densidades igual a 0, como se muestra en la Figura 3.2.

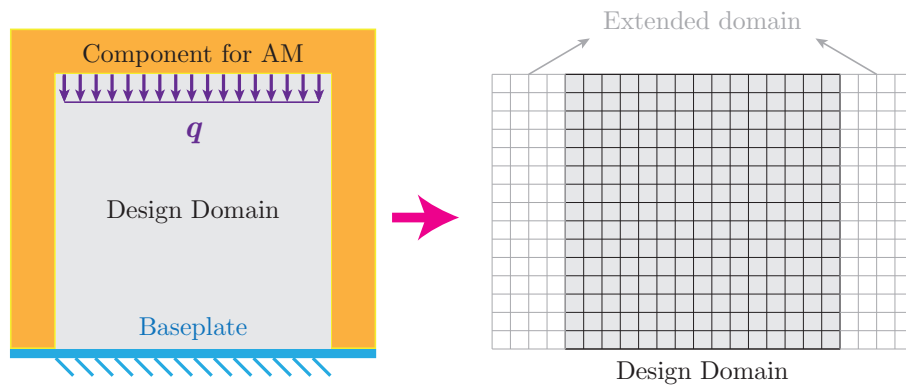


Figura 3.2: Extensión del dominio utilizando elementos con densidad cero.

3.1.2 Proyección

La estrategia de filtrado es eficiente en eliminar ciertas singularidades geométricas como el tablero de ajedrez. Sin embargo, dado que el campo filtrado corresponde a un promedio ponderado dentro de una región circular de radio r_{fil} , el diseño filtrado posee una superficie borrosa, donde la transición entre sólido y vacío no es clara producto de las densidades intermedias. Para eliminar dicha región de transición, se usa una función escalonada. La función utilizada para realizar la proyección se muestra en la ecuación 3.5 y fue propuesta por [Xu et al., 2010]. En la ecuación 3.5, β se encarga de controlar la pendiente de la función escalonada, mientras que la variable μ define el punto de inflexión de la función. Al variar los valores de μ se puede generar los distintos diseños del enfoque robusto que corresponden a los diseños erosionado, intermedios y dilatados como se muestra en la Figura 3.3.

$$\bar{\rho} = H(\tilde{\rho}, \beta, \mu) = \frac{\tanh(\beta\mu) + \tanh(\beta(\tilde{\rho} - \mu))}{\tanh(\beta\mu) + \tanh(\beta(1 - \mu))} \quad (3.5)$$

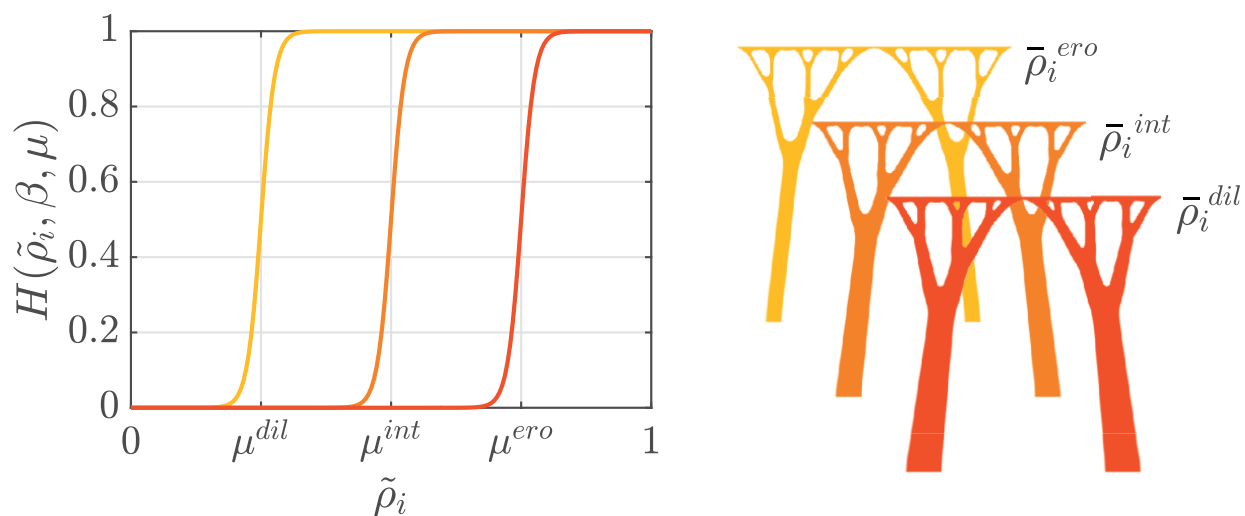


Figura 3.3: La figura muestra el esquema de tres campos ρ , $\tilde{\rho}$, y $\bar{\rho}$. En la fase de proyección se muestran 3 funciones escalonadas que dan lugar a 3 diseños, denominados erosionado, intermedio y dilatado. Estos diseños se muestran en amarillo, naranja y rojo, respectivamente.

3.1.3 Formulación robusta

Como se mencionó anteriormente, la estrategia de filtro elimina singularidades geométricas, mientras que la función de proyección escalonada permite reducir las densidades intermedias que son inherentes del proceso de filtrado. Estas dos técnicas, el filtro y la proyección, permiten controlar el tamaño mínimo de los miembros estructurales, pero no permite controlar el tamaño mínimo de las cavidades. Dado que el control geométrico de ambas entidades es crucial en este trabajo, se adopta la formulación robusta.

La formulación robusta fue propuesta por [Sigmund, 2009], y se basa en garantizar que el diseño optimizado sea de alto desempeño incluso si éste es erosionado o engrosado durante el proceso de manufactura (por ejemplo, debido al mal posicionamiento de una herramienta de frezado).

Para garantizar la robustez en cuanto a errores de manufactura que pueden adelgazar o engrosar el diseño de referencia, Sigmund involucra los tres diseños en el problema de optimización topológica, es decir:

$$\begin{aligned}
 \min_{\rho} \quad & \max(\mathbf{f}^T \mathbf{u}^{\text{ero}}, \mathbf{f}^T \mathbf{u}^{\text{int}}, \mathbf{f}^T \mathbf{u}^{\text{dil}}) \\
 \text{s.t.} \quad & \mathbf{v}^T \bar{\rho}^{\text{ero}} \leq V_{\text{ero}}^* \\
 & \mathbf{v}^T \bar{\rho}^{\text{int}} \leq V_{\text{int}}^* \\
 & \mathbf{v}^T \bar{\rho}^{\text{dil}} \leq V_{\text{dil}}^* \\
 & 0 \leq \rho_i \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

donde los superíndices ero, int y dil se refieren a los diseños erosionado, intermedio y dilatado, respectivamente. $\mathbf{f}^T \mathbf{u}$ representa el trabajo de las fuerzas externas evaluada en el diseño respectivo. Los desplazamiento nodales son obtenidos al resolver la ecuación lineal de equilibrio $\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}$.

Cuando se minimiza el trabajo de las fuerzas externas (o se maximiza la rigidez estructural), como en la ecuación 3.6, es posible remover los diseños intermedio y dilatado de la función objetivo, ya que el diseño erosionado siempre posee menor rigidez estructural. Además, el diseño dilatado siempre es el mas voluminoso, por lo que los diseños erosionado e intermedio pueden ser removidos de la restricción de volumen. De esta manera, el problema de optimización de la ecuación 3.6 se reduce a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \min_{\rho} \quad & \mathbf{f}^T \mathbf{u}^{\text{ero}} \\
 \text{s.t.} \quad & \mathbf{v}^T \bar{\rho}^{\text{dil}} \leq V_{\text{dil}}^* \\
 & 0 \leq \rho_i \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

3.2 Interpolación SIMP

Como se mencionó anteriormente, la estrategia de filtrado, la función de proyección y la formulación robusta, en conjunto permiten controlar el tamaño mínimo de las cavidades y de los miembros estructurales, además de obtener diseños con baja cantidad de densidades interme-

días. Únicamente falta describir la ecuación que permite formular el problema de la óptima distribución espacial de material.

Bajo la formulación de la densidad, las variables de diseño penalizan la contribución mecánica de cada elemento finito. Considerando un material isotrópico y lineal, la variable de diseño penaliza el módulo de Young E_i del elemento finito i , como se muestra a continuación:

$$E_i = E_{min} + \bar{\rho}_i^\eta (E_0 - E_{min}) \quad (3.8)$$

donde E_0 corresponde al módulo de Young del material sólido y E_{min} de la fase vacía. E_{min} debe ser un número suficientemente pequeño para que no influya en el rendimiento estructural, pero suficientemente grande para evitar singularidades numéricas en la matriz de rigidez \mathbf{K} . Típicamente, $E_0/E_{min} = 10^{-6}$. El parámetro η es definido por el usuario y representa una penalización sobre las densidades intermedias, por tal motivo su nombre SIMP (de sus siglas en inglés, haciendo referencia a Material Sólido Isotrópico con Penalización) tal y como se mostró en la Figura 2.2. En este trabajo, el parámetro de penalización η se fija en 1.0 al inicio del problema de optimización y cada 40 iteraciones η se aumenta en 0.25, hasta llegar a un máximo de 3.0.

3.3 Solución numérica del problema de optimización

El problema de optimización de la ecuación 3.7 resulta ser altamente no-lineal, involucra una gran cantidad de variables de diseño, y funciones implícitas con respecto a las variables de diseño. Es decir, es imposible resolver el problema de optimización topológica de forma analítica. Además, dado el gran número de variables de diseño, los algoritmos genéticos son inviables de implementar debido al alto costo computacional asociado a un gran número de iteraciones. El método numérico más eficiente que ha sido propuesto hasta ahora es el algoritmo de Linearización Secuencial [Schmit and Fleury, 1980].

Explicar detalladamente el algoritmo SLP esta fuera de los alcances de este trabajo, razón por la cual se presenta a continuación la idea fundamental del algoritmo.

El principio del algoritmo SLP es de aproximar por series de Taylor cada función presente en el problema de optimización de la ecuación 3.7. La aproximación se debe realizar para un valor conocido de ρ^{it} , donde it denota una iteración. Si la función de aproximación alrededor de ρ^{it} es una función cuadrática (parábola) o una lineal (línea recta) entonces el problema de optimización, originalmente complejo, pasa a ser uno simple de resolver. Sin embargo, dado que la aproximación es local, es decir, válida solamente alrededor de ρ^{it} , el movimiento de las variables de diseño debe ser restringido. Debido a esto, el problema debe resolverse iterativamente, mediante pequeñas modificaciones de las variables de diseño.

Una variante mejorada del algoritmo mencionado, denominado MMA (Método de Movimiento de Asintotas) es utilizado en este trabajo [Svanberg, 1987].

3.4 Tamaño mínimo en la fase vacía y sólida

Controlar el tamaño mínimo de las cavidades y de las partes sólidas es importante en la optimización topológica, ya que eso garantiza que el diseño optimizado se ajusta a los requerimientos de fabricación. Por ejemplo, el tamaño mínimo de la fase sólida puede representar el tamaño de una barra, la resolución de un proceso de fabricación, o el tamaño de una boquilla de deposición en un proceso de manufactura aditiva. Por otro lado, el tamaño mínimo de las cavidades puede ser asociado al diámetro de una herramienta de fresado.

En este trabajo, el tamaño mínimo de las partes estructurales es definido por el radio $r_{\min, \text{Solid}}$ del mayor círculo que puede ser inscrito en las partes más delgada de la estructura optimizada. De forma similar, el tamaño mínimo de las cavidades es definido por el radio $r_{\min, \text{Void}}$ del círculo más grande que puede ser inscrito en las cavidades de la estructura optimizada. La formulación robusta basada en los diseños erosionado, intermedio y dilatado, permite imponer, sobre el diseño intermedio, el tamaño mínimo de las partes sólidas y de las cavidades, las que se denotan por $r_{\min, \text{Solid}}^{\text{int}}$ y $r_{\min, \text{Vacio}}^{\text{int}}$ para el diseño intermedio. Los tamaños mínimos $r_{\min, \text{Solid}}^{\text{int}}$ y $r_{\min, \text{Vacio}}^{\text{int}}$ deben ser impuestos de forma implícita a través de los parámetros que definen el filtro y la proyección escalonada, es decir, a través de r_{fil} , μ^{ero} , μ^{int} y μ^{dil} .

La relación entre los parámetros de mínimo tamaño de escala ($r_{\min, \text{Solid}}$ y $r_{\min, \text{Void}}$) y los parámetros r_{fil} , μ^{ero} , μ^{int} y μ^{dil} se puede obtener de forma numérica [Wang et al., 2011]. Esta relación numérica puede ser graficada, como se muestra en la Figura 3.4.

3.5 Tamaño máximo

Además del control de tamaño mínimo mencionado anteriormente, en este trabajo se requiere el control sobre el tamaño máximo de las partes sólidas. Aquí, esta restricción es usada para limitar la zona de contacto entre el material soporte y la pieza a ser impresa, con el objetivo de facilitar la remoción de los soportes.

El tamaño máximo es controlado mediante una restricción que debe ser incorporada en el problema de optimización topológica. Esta restricción consiste en limitar la cantidad de material sólido dentro de una región Ω_i que rodea a cada elemento finito i . Como se muestra en la Figura 3.5a, la región Ω_i se define anular de radio externo r_{\max} y radio interno $r_{\min, \text{Solid}}$.

De forma matemática, la restricción de tamaño máximo que se aplica alrededor de cada elemento finito i es la siguiente:

$$g_i = \varepsilon - \frac{\sum_{j \in \Omega_i} v_j (1 - \tilde{\rho}_j)^q}{\sum_{j \in \Omega_i} v_j} \leq 0 \quad (3.9)$$

Donde ε representa la fracción de vacío que debe existir dentro de la región local Ω_i . La expresión $(1 - \tilde{\rho}_j)$ representa la cantidad de vacío de un elemento y q representa un parámetro de penalización. De esta manera, mientras no existe una fracción de vacío mayor a ε se castigan los elementos con densidades intermedias hasta que se cumpla la restricción. La implementación

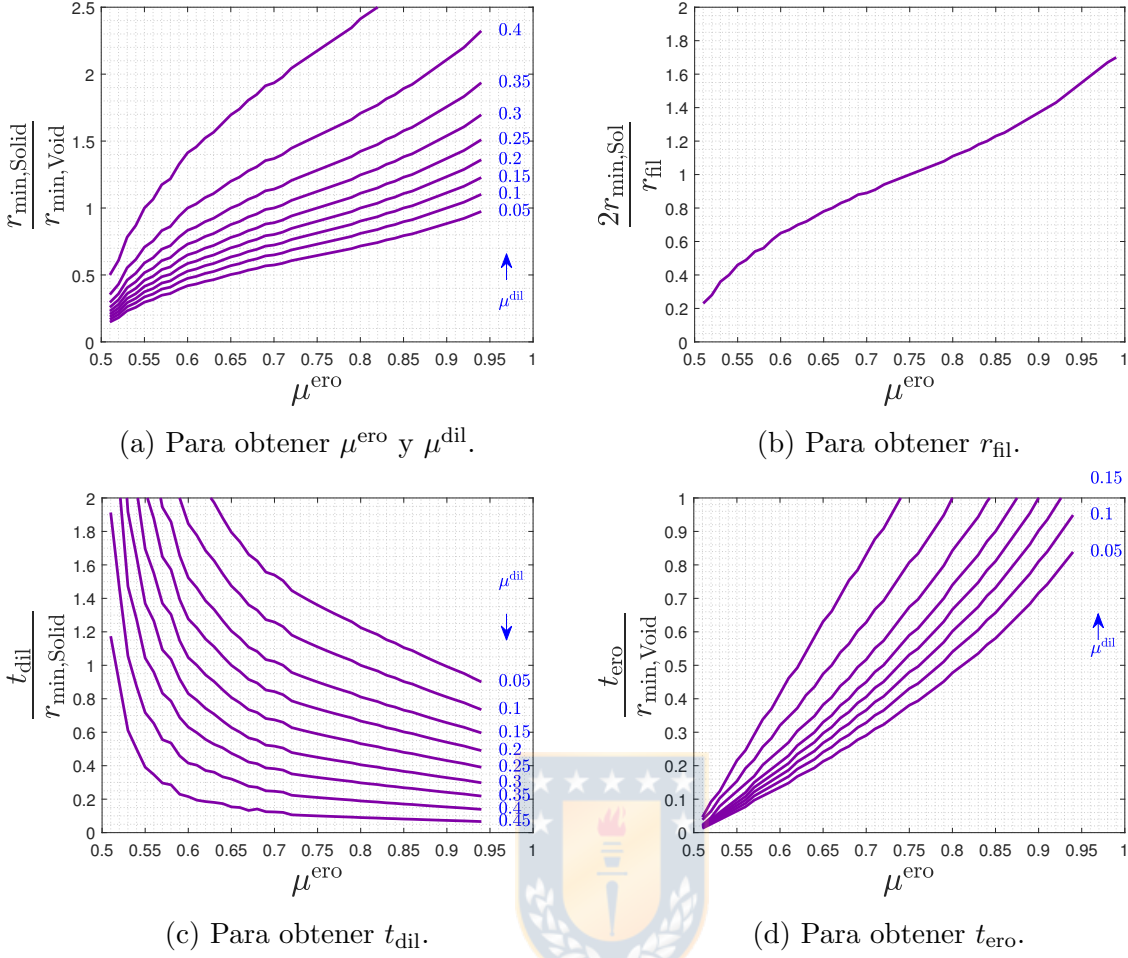


Figura 3.4: Gráficos obtenidos de forma numérica que permiten obtener los parámetros para controlar la escala de longitud.

de la restricción de tamaño máximo en el problema de optimización topológica formulada bajo el enfoque de diseño robusto se encuentra detallado en [Fernández et al., 2019].

3.6 Tamaño mínimo variable

Una práctica común en la optimización topológica es imponer un tamaño mínimo uniforme en todo el dominio de diseño. Sin embargo, en este trabajo se implementa una estrategia basada en la definición de un tamaño mínimo variable con respecto al espacio de diseño, es decir, $r_{\text{min,Solid}}^{\text{int}}(\mathbf{x})$ y $r_{\text{min,Void}}^{\text{int}}(\mathbf{x})$. Esto se ilustra en la Figura 3.6, donde el tamaño mínimo se define linealmente variable en la dirección vertical del diseño. Matemáticamente, el tamaño mínimo queda definido por:

$$r_{\text{min,Solid}}^{\text{int}} = \frac{r_{\text{min,Solid,ini}}^{\text{int}} - r_{\text{min,Solid,fin}}^{\text{int}}}{N_y - 1} \cdot (j - 1) + r_{\text{min,Solid,fin}}^{\text{int}} \quad (3.10)$$

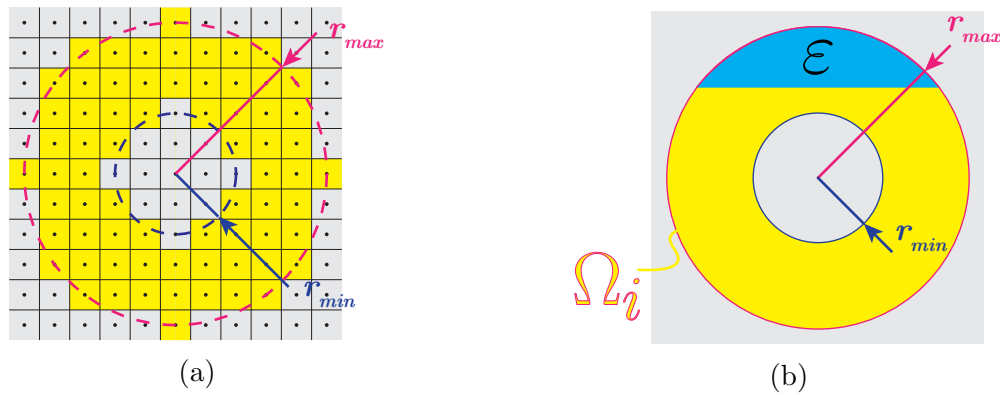


Figura 3.5: En a) Región donde se aplica la restricción. En b) porcentaje vacío que debe existir dentro del área Ω_i .

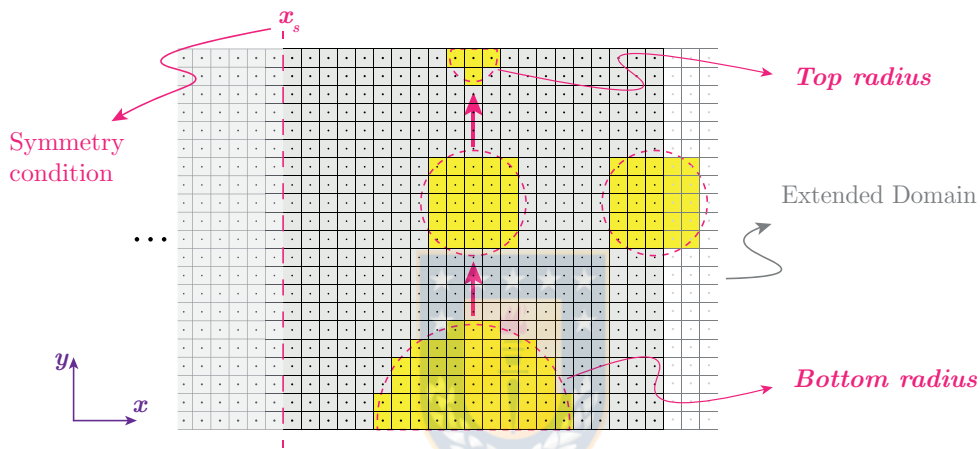


Figura 3.6: Cambio lineal de tamaño mínimo.

donde $r_{\min, \text{Solid}, \text{ini}}^{\text{int}}$ y $r_{\min, \text{Solid}, \text{fin}}^{\text{int}}$ denotan el tamaño mínimo en la base y en el techo del diseño, respectivamente. N_y representa al número de elementos finitos discretizando una línea vertical del diseño y y_j corresponde a la posición vertical del elemento finito j .

3.7 Restricción de ángulo de inclinación

Existen una gran variedad de formas para restringir el ángulo crítico de inclinación. Sin embargo, los soportes optimizados en este trabajo suelen poseer ángulos de inclinación suficientemente grandes como para evitar el colapso estructural durante la impresión. Además, cuando aparecen estructuras con ángulos menores al crítico, éstas suelen ser pequeñas en tamaño, por lo cual no ofrecen dificultades de impresión. Por tales motivos, no es esencial controlar la inclinación de las partes estructurales que componen a los diseños optimizados. En los casos que se restringa el ángulo crítico de inclinación, se utiliza la restricción presentada en el trabajo [Fernández et al.,].

CAPÍTULO 4

Pautas geométricas de la manufactura aditiva para la generación de soportes

Las pautas geométricas son recomendaciones que tienen por objetivo facilitar el proceso de impresión, principalmente, evitando la presencia de diseños con geometrías que puedan ser un desafío para cierto proceso de manufactura aditiva.

Una práctica común para obtener las pautas geométricas de cierta impresora 3D, es seguir un enfoque cualitativo. Este enfoque es usado por la compañía Formlabs [Formlabs, 2020] y es igualmente implementado en este trabajo. La idea de este enfoque es de imprimir varias geometrías e identificar las dificultades. Usualmente, las geometrías difíciles de imprimir presentan desprendimiento de material, riesgo de romper la pieza al retirarla de la impresora, que la geometría no se pueda imprimir, entre otros.

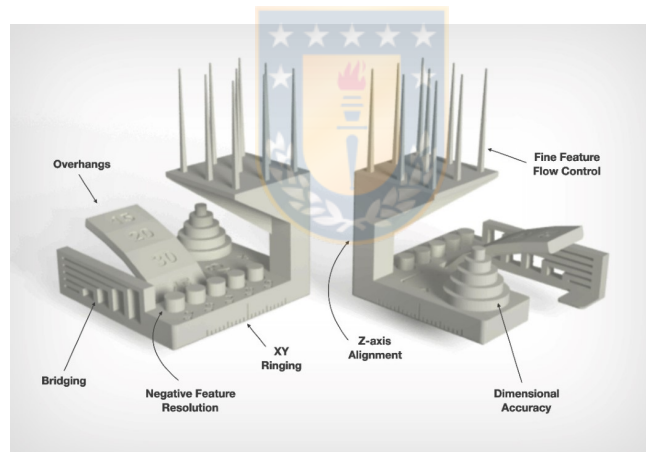


Figura 4.1: Diseño de pieza para obtener pautas geométricas de la manufactura aditiva. Imagen obtenida de [All3DP, 2020].

Se pueden encontrar diferentes tipos de piezas que permiten evaluar las pautas geométricas de impresoras 3D, como por ejemplo la geometría que se muestra en la Figura 4.1. Sin embargo, en este trabajo solo se consideran las restricciones geométricas para la optimización de piezas 2D y se dividen en 2 grupos, las pautas geométricas para el control de escala de longitud de los soportes que se muestran en la Tabla 4.1 y las pautas geométricas que permiten conocer cuándo una pieza necesita el uso de soportes para que esta se imprima correctamente, las cuales, se muestran en la Tabla 4.3.

Para el caso de la manufactura aditiva las pautas geométricas dependen de muchos factores como la tecnología de impresión, el material utilizado, el modelo específico de la impresora, e incluso de los parámetros de impresión (velocidad, temperatura, relleno, etc.) [Vanek et al., 2014, Jiang et al., 2018]. La influencia de estos parámetros sobre las pautas geométricas está fuera

Tabla 4.1: Pautas geométricas utilizadas para el control de longitud de los soportes.

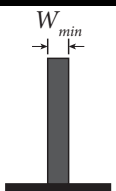
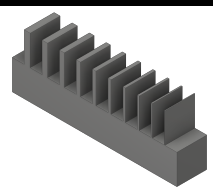
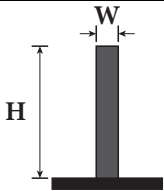
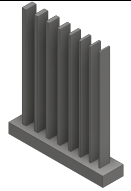
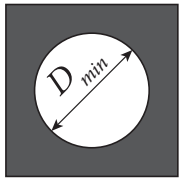
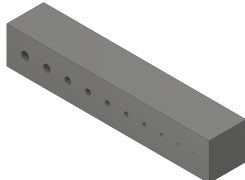
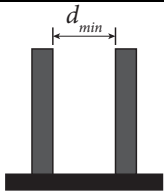
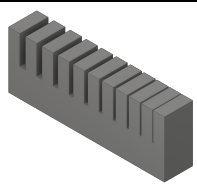
Pauta geométrica	Geometría a imprimir	Descripción
		Mínimo espesor de pared: Las paredes muy delgadas no pueden ser impresas.
		Relación de aspecto: Las piezas muy esbeltas suelen ser inestables durante la impresión.
		Mínimo tamaño de agujero: Los agujeros muy pequeños no pueden ser impresos.
		Mínima separación entre miembros: Los espacios muy angostos no pueden ser impresos.

Tabla 4.2: Parámetros de impresión y especificaciones de la impresora utilizados en cada una de las piezas impresas de este trabajo.

Parámetros	Valor utilizado
Grosor de las capas	0.1 [mm]
Porcentaje de relleno	100%
Patrón de relleno	Lineas
Velocidad de impresión	20 [mm/s]
Temperatura de la boquilla	210 C°
Velocidad de los ventiladores	100%
Temperatura de la base	60°
Material (marca)	PLA (Cicla 3D)
Diámetro de la boquilla	0.4 [mm]

del marco de este trabajo, y aquí simplemente se presenta un conjunto de pautas geométricas obtenido para un conjunto específico de parámetros de impresión, los que se detallan en la Tabla 4.2.

Para obtener estas pautas geométricas se imprimen un serie de piezas que se muestran en la segunda columna de la Tablas 4.1 y 4.3, de manera de obtener de forma experimental el valor de estas. Para obtener el rango de parámetros que garantizan una impresión exitosa, se debe hacer la distinción entre la estructura soporte y la pieza útil.

La pieza útil corresponde al diseño que debe ser fabricado y sobre el cual se requiere cumplir con cierto estándar de calidad. Por otro lado, la estructura soporte es el que asiste el proceso de impresión proveyendo de soporte mecánico a las capas que lo necesiten. Dado que la estructura soporte es desechada después del proceso de impresión, no es necesario que éste cumpla cierto criterio de calidad, solo basta con que éste cumpla su función de apoyar el proceso de impresión.

Para obtener las pautas geométricas de la pieza útil, se inspecciona en detalle las piezas impresas a partir de los diseños de la Tabla 4.3. El propósito es detectar los defectos de impresión que definen a una pieza defectuosa. Como pieza defectuosa, se considera aquella que presente grandes protuberancias o una distorsión considerable en la superficie sobresaliente.

Por otro lado, dado que no se requiere cierta calidad geométrica en las estructuras soporte, la idea de las pautas geométricas es garantizar la impresión de estas para que cumplan su función fundamental. Para ello, se imprimen las piezas de la Tabla 4.1, como soporte defectuosos se considera aquel que no se pueda imprimir tal como se muestra en el diseño original o que no sea capaz de dar el correcto soporte a la pieza que se desea imprimir.

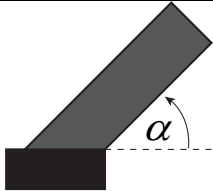

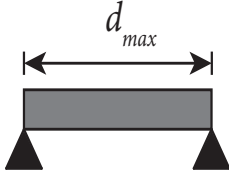
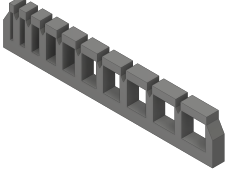
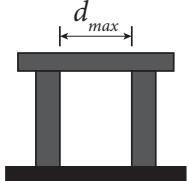
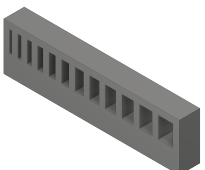
El objetivo es que la parte sobresaliente se pueda imprimir de forma correcta, es decir, que las imperfecciones que presente sean aceptables tal como se determina en las pautas geométricas. Como también, que los soportes generados sean capaces de sustentarse a si mismo y también dar sustento la pieza que se desea imprimir. Los soportes deben ser fáciles de remover, para esto, se utiliza la misma técnica que utilizan la mayoría de los métodos geométricos, reducir el área de contacto entre la pieza y el soporte. Es para lograr estos objetivos, que es necesario conocer los límites en los que puede trabajar la impresora 3D, los cuales se detallan a continuación.

4.1 Pautas geométricas para el control de longitud de los soportes

El objetivo de los soportes es dar sustento a la estructura que se desea imprimir. Una vez finalizada la impresión de la pieza estos soportes deben ser removidos y básicamente se vuelven basura (el reciclaje de ciertos termoplásticos se puede realizar una cierta cantidad de veces antes de que necesiten repolimerización). Por tal motivo, al escoger los valores de las pautas geométricas para el control de longitud de los soportes no se busca una gran calidad de impresión, más bien, se busca que estos soportes se puedan imprimir y que sean capaces de sostenerse a si mismo.

Para asegurar la imprimibilidad de los soportes a ser diseñados por optimización topológica, se analizan las siguientes 4 pautas geométricas.

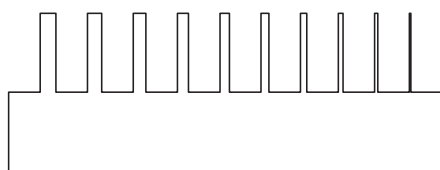
Tabla 4.3: Pautas geométricas utilizadas para definir cuando se deben utilizar soportes en la impresión 3D.

Pauta geométrica	Geometría a imprimir	Descripción
		Ángulo de inclinación: Existe un ángulo crítico para que la pieza se pueda imprimir sin la necesidad de soportes.
		Máxima distancia entre apoyos simples: Mientras más distancia entre apoyos simples, peor calidad superficial tendrá la estructura sobresaliente.
		Máxima separación entre bordes: Mientras más distancia entre bordes, peor calidad superficial tendrá la estructura sobresaliente.

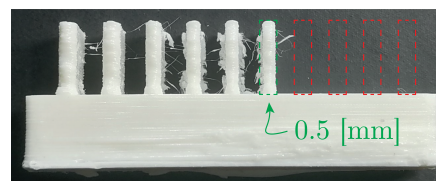
4.1.1 Mínimo espesor de pared

Ya que en este trabajo se busca la optimización de soportes en 2D, el mínimo espesor de pared se puede asociar a la resolución de la impresora. Este es el valor más importante respecto a la imprimibilidad de los soportes, ya que es necesario que el diseño obtenido por optimización topológica no posea ningún miembro con un espesor menor al obtenido en la Tabla 4.4, ya que de lo contrario no se imprimirá, dejando la pieza inconclusa como se muestra en la Figura 4.2b.

Para determinar el mínimo espesor de pared se imprime la geometría ilustrada en la Figura 4.2a, obteniendo la pieza que se muestra en la Figura 4.2b. Como se puede observar la impresora no pudo imprimir espesores menores a 0.5 [mm], por lo tanto, este es el valor que se escoge como mínimo espesor de pared. Cabe destacar que el mínimo espesor de pared impreso no muestra defectos que puedan afectar la imprimibilidad de los soportes.



(a)



(b)

Figura 4.2: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el mínimo espesor de pared. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora donde se indica el espesor de la pared más delgada que se pudo imprimir.

4.1.2 Mínimo tamaño de agujero

El mínimo tamaño de agujero no es relevante para la que los soportes cumplan su función, pero permite que el soporte impreso posea el mismo diseño que se obtiene de la optimización topológica. Para determinar este valor se imprime la pieza que se observa en la Figura 4.3a, obteniendo la pieza que se muestra en la Figura 4.3b en donde se indica el mínimo tamaño de agujero que se puede imprimir.

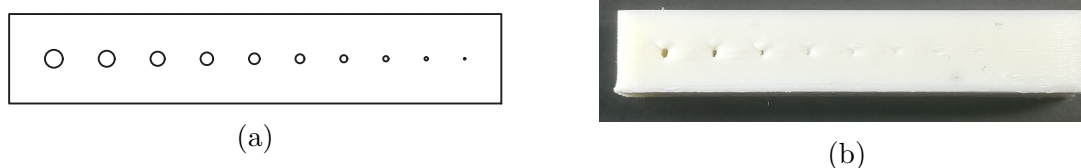


Figura 4.3: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el mínimo tamaño de agujero. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker.

4.1.3 Mínima separación entre miembros

La mínima separación entre miembros es importante debido a que si esta se da en la interfaz soporte - pieza, se puede producir la unión entre 2 miembros, lo cual, implicaría una mayor área de contacto dificultando la posterior remoción de estos. Otra razón por la cual se quiere controlar la mínima separación entre miembros, es para asegurar que el diseño impreso sea el mismo que el obtenido de la optimización topológica.

En la Figura 4.4a se observa el diseño a imprimir, obteniendo la pieza que se muestra en la Figura 4.4b. Es posible observar que para espacios muy pequeños las paredes se acaban pegadas. Por lo cual, se considera que una separación de paredes adecuada es de 0.4 [mm].

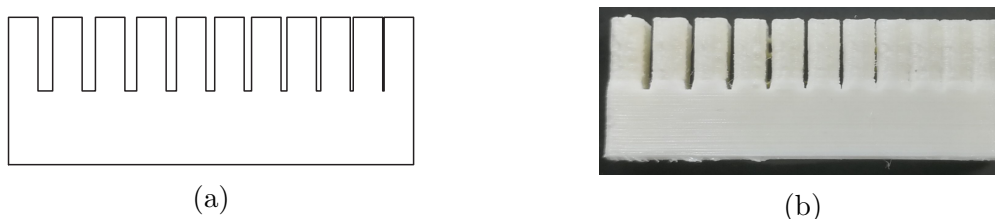


Figura 4.4: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la mínima separación entre miembros. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker.

4.1.4 Relación de aspecto

Muchos fabricantes de impresoras 3D recomiendan ciertas relaciones de aspecto que pueden poseer las piezas que se van imprimir, dado que si estas piezas poseen relaciones de aspectos muy grandes pueden sufrir deformaciones como las que se muestran en la Figura 4.6c. En el caso de la impresora con tecnología FDM estas deformaciones se producen debido a la acumulación de las desviaciones geométricas durante el proceso de impresión 3D [Feng et al.,].

En la Figura 4.5a se muestra la geometría a imprimir, y en la Figura 4.5b se observa la pieza impresa. Se puede observar que la impresora pudo imprimir cada una de las columnas sin que estas sufran grandes deformaciones. Sin embargo, como se observa en las Figuras 4.6a y 4.6b, para las 2 columnas más delgadas se pueden observar pequeñas distorsiones producidas en los tramos más altos de la estructura.



Figura 4.5: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima relación de aspecto. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker.

En la Figura 5.3 se puede observar la forma que poseen los soportes generados con optimización topológica, la cuales, poseen diseños con ramificaciones estructurales que se asimilan a los árboles. El valor recomendado se obtiene pensando en la estructura que suele aparecer al medio de los soportes la cual es similar a una columna como las que presenta la pieza mostrada en la Figura 4.5b. Sin embargo, para el resto de la estructura es difícil encontrar una geometría que permita encontrar un valor relación de aspecto, ya que, es difícil conocer a priori la forma final que tendrán los soportes. En comparación con otros trabajos que generan soportes utilizando métodos geométricos como los que se mostraron en la Figura 1.3, estos suelen utilizar piezas como las que se muestran en la Figura 4.6c para determinar una relación longitud/ángulo, donde se puede observar que en al sobrepasar una cierta longitud, la columna comienza a deformarse. Sin embargo, este tipo de relaciones es útil en los métodos geométricos, ya que en estos es posible controlar en que momento se produce la ramificación de las estructuras, a diferencia de la optimización topológica en donde no se puede conocer a priori la forma que poseerán los soportes.

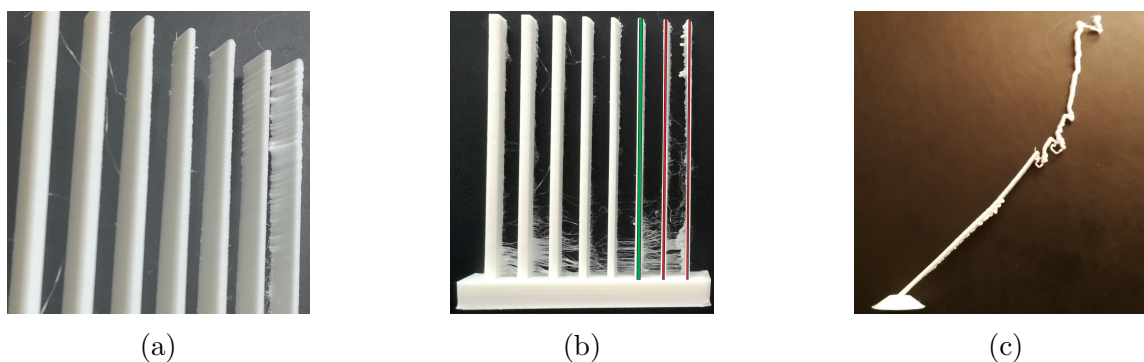


Figura 4.6: En (a) foto de la cara lateral de las columnas con grandes relaciones de aspecto. En b) foto frontal de las columnas. En c) foto de la pieza que se utiliza para obtener la relación longitud/ángulo.

4.1.5 Pautas geométricas recopiladas

Finalmente, se obtienen las pautas geométricas que se deben considerar al momento de optimizar soportes para la manufactura aditiva, los cuales se resumen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Pautas geométricas obtenidas para el control de longitud de los soportes para la impresora Ultimaker S2⁺.

Pauta geométrica	Valor obtenido
Mínimo espesor de pared	0.5 [mm]
Mínimo tamaño de agujero	0.8 [mm]
Mínima separación entre miembros	0.4 [mm]
Relación de aspecto (Altura/Ancho)	50

4.2 Pautas geométricas para la impresión de partes en voladizo

A diferencia de las pautas anteriores, las cuales eran para el control de longitud de los soportes, estas están relacionadas con la pieza que se desee imprimir. De manera de poder determinar cuándo es necesario el uso de soportes. Al igual que en el caso anterior, estos valores se escogen de forma cualitativa y bajo cierto criterio de calidad impuesto, con la diferencia que para estas pautas se escogen rangos de valores según la calidad de impresión presente en las piezas, como se resume en la Tabla 4.5. Es importante destacar que los valores obtenidos se clasifican en 3 rangos según la calidad de la superficial de la estructura, los cuales, se definen como calidad baja, media o alta.

A continuación se presentan las piezas impresas que se utilizan para determinar cuando una estructura necesita el uso de soportes.

4.2.1 Máxima separación entre bordes

La máxima separación entre bordes, cuyo esquema se muestra en la Figura 4.7a, busca encontrar la distancia máxima que define una impresión de calidad Baja, Media y Alta. El criterio de selección evalúa la calidad superficial de la pieza útil definida entre 2 soportes.

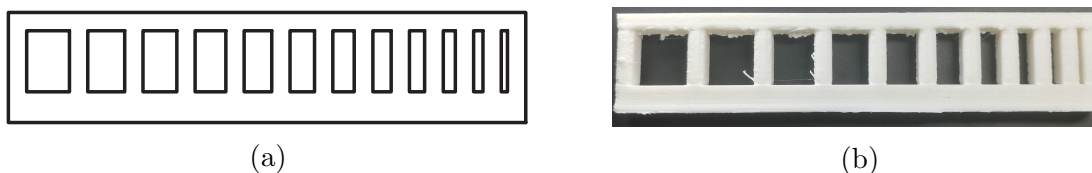


Figura 4.7: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima distancia entre los bordes. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker.

Se puede observar que a medida que aumenta la distancia entre los bordes empeora la calidad de la superficie de las caras inferiores como se puede observar en las Figura 4.8a y Figura 4.8b. Para grandes distancias comienza a observarse la formación pequeños grumos en la cara inferior de la estructura sobresaliente. La calidad superficial de las superficies sobresalientes se clasifican en la Tabla 4.3.

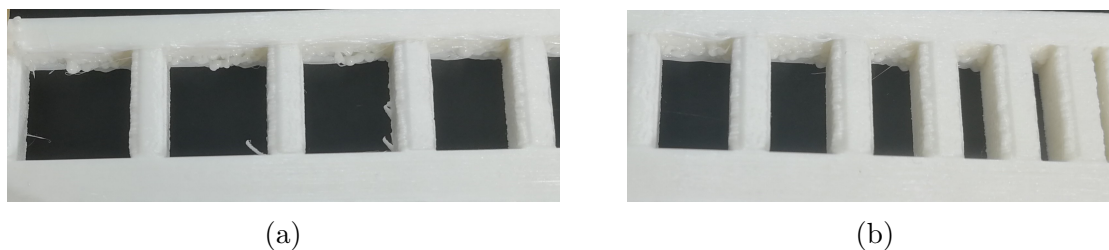


Figura 4.8: En (a) calidad de la superficie inferior para distancias pequeñas entre bordes. En (b) calidad de la superficie inferior para distancias más grandes entre bordes.

4.2.2 Máxima distancia entre apoyos simples

La máxima separación entre apoyos simples busca encontrar la distancia adecuada entre soportes para obtener una buena calidad en la superficie de la pieza que se desea imprimir. En la Figura 4.9a se muestra la pieza a imprimir y en la Figura 4.9b la pieza impresa.



Figura 4.9: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar la máxima distancia entre apoyos simples. En (b) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker.

Al igual que en la geometría anterior, a medida que aumenta la distancia empeora la calidad de la superficie inferior como se puede observar en las Figura 4.10a y 4.10b. En la Tabla 4.5 se muestran las distancias adecuadas para la separación entre soportes.

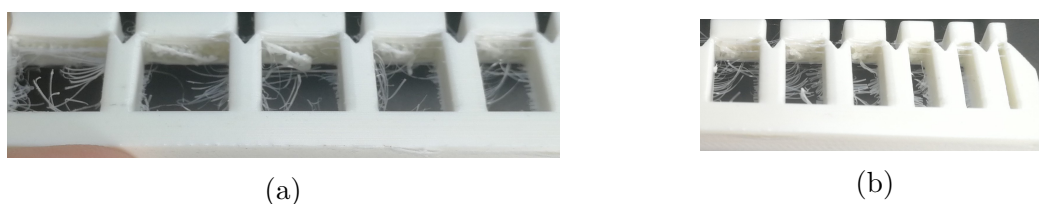


Figura 4.10: En (a) calidad de la superficie inferior para distancias grandes entre apoyos simples. En (b) calidad de la superficie inferior para distancias pequeñas entre apoyos simples.

4.2.3 Ángulo crítico de inclinación

La impresión de piezas con estructuras inclinadas presenta dificultades a la hora de fabricar con manufactura aditiva. Por tal motivo, se recomienda que piezas con partes inclinadas presenten un ángulo de inclinación mayor a cierto ángulo crítico. Si la pieza llegara a presentar estructuras con ángulos menores al ángulo crítico, entonces dichas estructuras requieren soportes.

En las Figuras 4.11a y 4.11b se muestra un esquema de la pieza a imprimir para determinar el ángulo crítico y el resultado se muestra en las Figuras 4.11c y 4.11d donde se observa que la impresora pudo imprimir cada miembro. Sin embargo, tal como se muestra en la Figura 4.12 la calidad de la superficie de la cara inferior de la estructura va empeorando a medida que se imprimen ángulos más pequeños. En la Tabla 4.5 se muestra la evaluación subjetiva de la calidad superficial para cada ángulo.

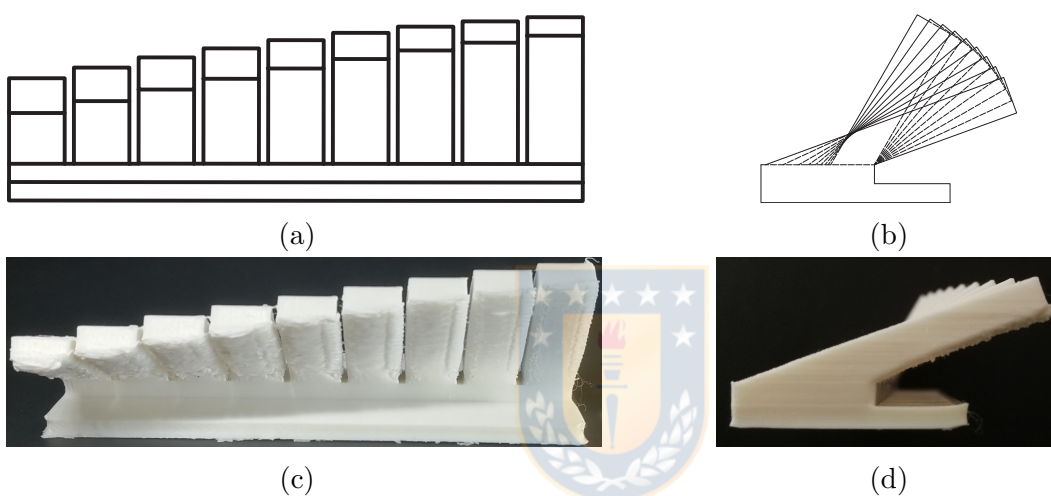


Figura 4.11: En (a) esquema de la pieza a imprimir para determinar el ángulo crítico. En b) esquema del perfil de la pieza a imprimir. En c) foto de la geometría fabricada por la impresora Ultimaker. En d) perfil de la pieza impresa.

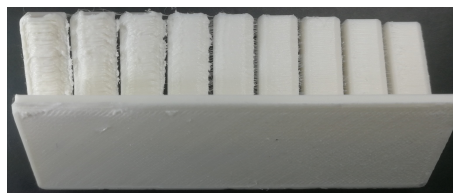


Figura 4.12: Distorsión de la cara inferior para ángulos pequeños.

En resumen, los valores de pautas geométricas para estructuras sobresalientes que se consideran en este trabajo son los que se muestra en la Tabla 4.5. Estos valores se escogen por la razones descritas anteriormente, las cuales fueron completamente cualitativas siguiendo cierto criterio de calidad impuesto. Cabe destacar que otros valores pueden ser escogidos dependiendo de las necesidades del usuario.

Tabla 4.5: Clasificación de los valores para las distintas pautas geométricas según su calidad superficial.

Pauta geométrica	Baja	Media	Alta
Máxima distancia entre bordes	Mayor a 7 [mm]	Entre 2 y 6 [mm]	Menor a 2 [mm]
Máxima distancia entre apoyos simples	Mayor a 6 [mm]	Entre 2 y 5 [mm]	Menor a 2 [mm]
Ángulo sobresaliente crítico	Menor a 35°	Entre 35° y 45°	50° o más

CAPÍTULO 5

Estudio de la generación de soportes

Este capítulo presenta los diferentes resultados obtenidos al incluir restricciones geométricas de la manufactura aditiva. También se presentan y comparan dos modelos de elementos finitos, y se analiza el efecto de diversos parámetros que gobiernan el proceso de optimización.

5.1 Formulación del problema

El modelo de elementos finitos que se utiliza para la generación de soportes es el que se plantea en la Figura 5.1. En color gris se muestra el espacio de diseño, la zona cuyo grados de libertad están fijos se muestran en celeste cuando estos corresponden a la base de la impresora, y en rojo cuando se considera que pueden unirse a las paredes laterales de la pieza que se desea imprimir, y las flechas en color morado representan la fuerza distribuida ejercida por el peso propio del componente de interés. El dominio es discretizado con elementos cuadrilaterales de 4 nodos y considerando condición de simetría cuando sea posible. En específico, se utilizan 250 elementos finitos de ancho y 501 de alto para obtener la mitad derecha de los soportes. En la primera fila se incluyen elementos sólidos pasivos en color negro cuyo espesor es de un elemento finito, en los cuales se aplica la fuerza distribuida, esta barra de elementos sólidos posteriormente es eliminada al momento de convertir los soportes obtenidos a formato STL. Por último, el espacio de diseño para la generación de soportes posee las dimensiones de 50[mm] de ancho y de alto, obteniendo una resolución de 0.1[mm].

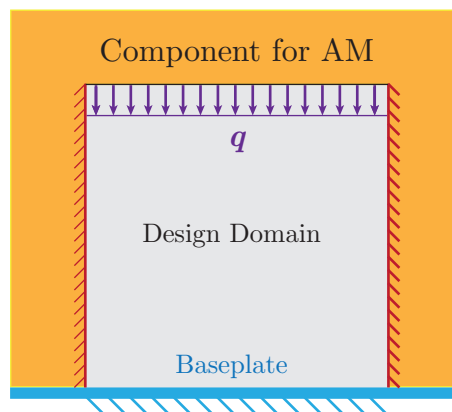


Figura 5.1: Modelo de elementos finitos para la optimización topológica de los soportes.

A continuación se presenta el análisis de diferentes parámetros que se utilizan en la optimización topológica, de manera de encontrar la metodología que permita generar soportes eficientes y fáciles de remover.

5.2 Efecto de las zonas de empotramiento

Como se mencionó anteriormente, el empotramiento de las estructuras de soporte se pueden imponer en diferentes partes, la más intuitiva puede ser cuando se fijan los elementos en la base de la impresora como se puede observar en la Figura 5.2a. Otra opción es fijar grados de libertad en la misma pieza como se puede observar en las Figuras 5.2b y 5.2c. Sin embargo, estos 2 últimos soportes presentan mayores áreas de contacto entre la pieza y los soportes, lo cual, dificulta su posterior extracción. Por tal motivo, siempre que sea posible, la condición de cero desplazamiento no debe imponerse en la pieza que se desea imprimir.

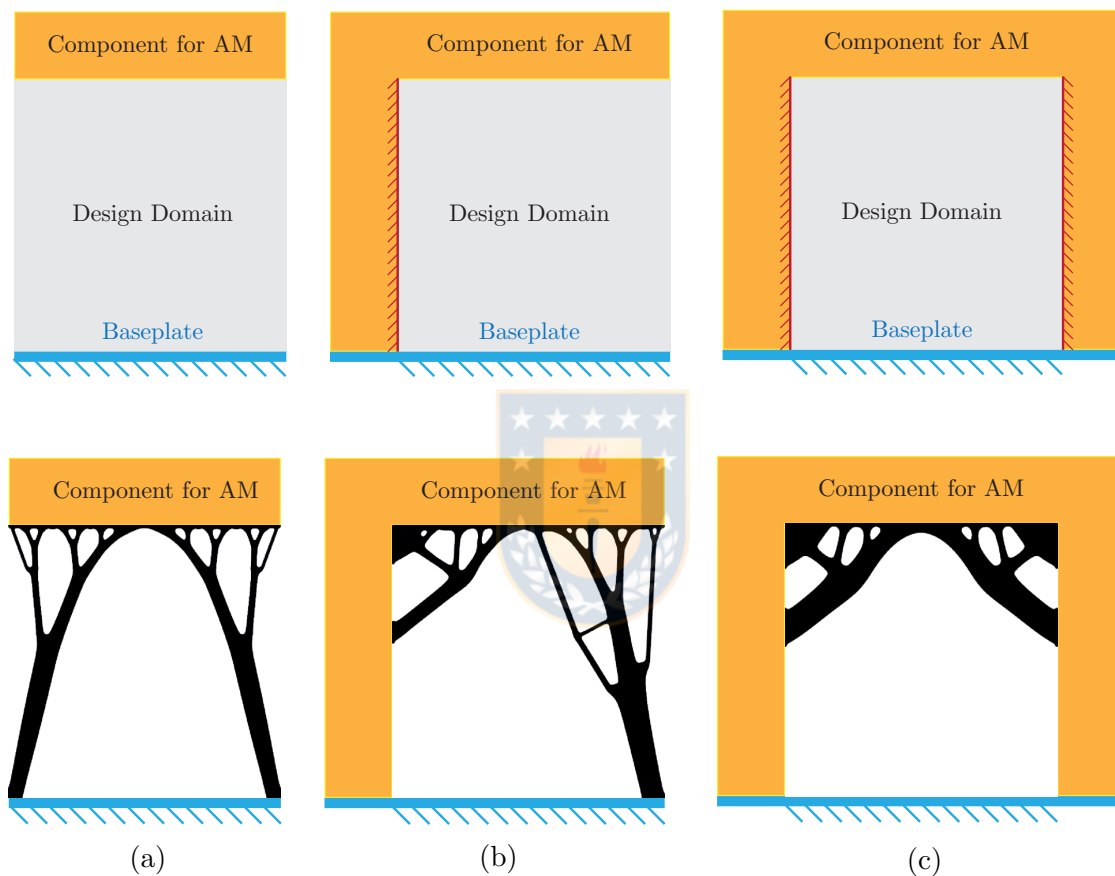


Figura 5.2: Arriba se muestra el modelo de elementos finitos y abajo los soportes obtenidos. En a) se muestra el resultado al empotrar solo la base de la impresora. En b) se incluye el empotramiento de una de las paredes de la pieza. En c) se empotra en ambas paredes de la pieza y en la base de la impresora.

5.3 Efecto de la fracción de volumen

Para generar soportes eficientes estos deben utilizar la menor cantidad de material posible. Sin embargo, fracciones de volumen extremadamente pequeñas pueden generar soportes que no cumplan con las pautas geométricas recomendadas o no sean capaces de sustentarse a si mismo. En la Figura 5.3 se muestran soportes generados con la misma formulación del problema de

optimización topológica y los mismos parámetros de optimización, pero variando únicamente la fracción de volumen de cada uno. Se puede observar que fracciones de volumen del 22.5% o más, presentan miembros bastante robustos y que dejan de ser eficientes debido a la gran cantidad de material que necesitan. Por otro lado, fracciones de volumen del 10% o menores presentan miembros bastante delgados que pueden entrar en conflicto cuando se incorporen las restricciones de la manufactura aditiva. Por tal motivo, se determina que un rango óptimo para generar soportes eficientes es entre fracciones de volumen de 12.5% y 20%.

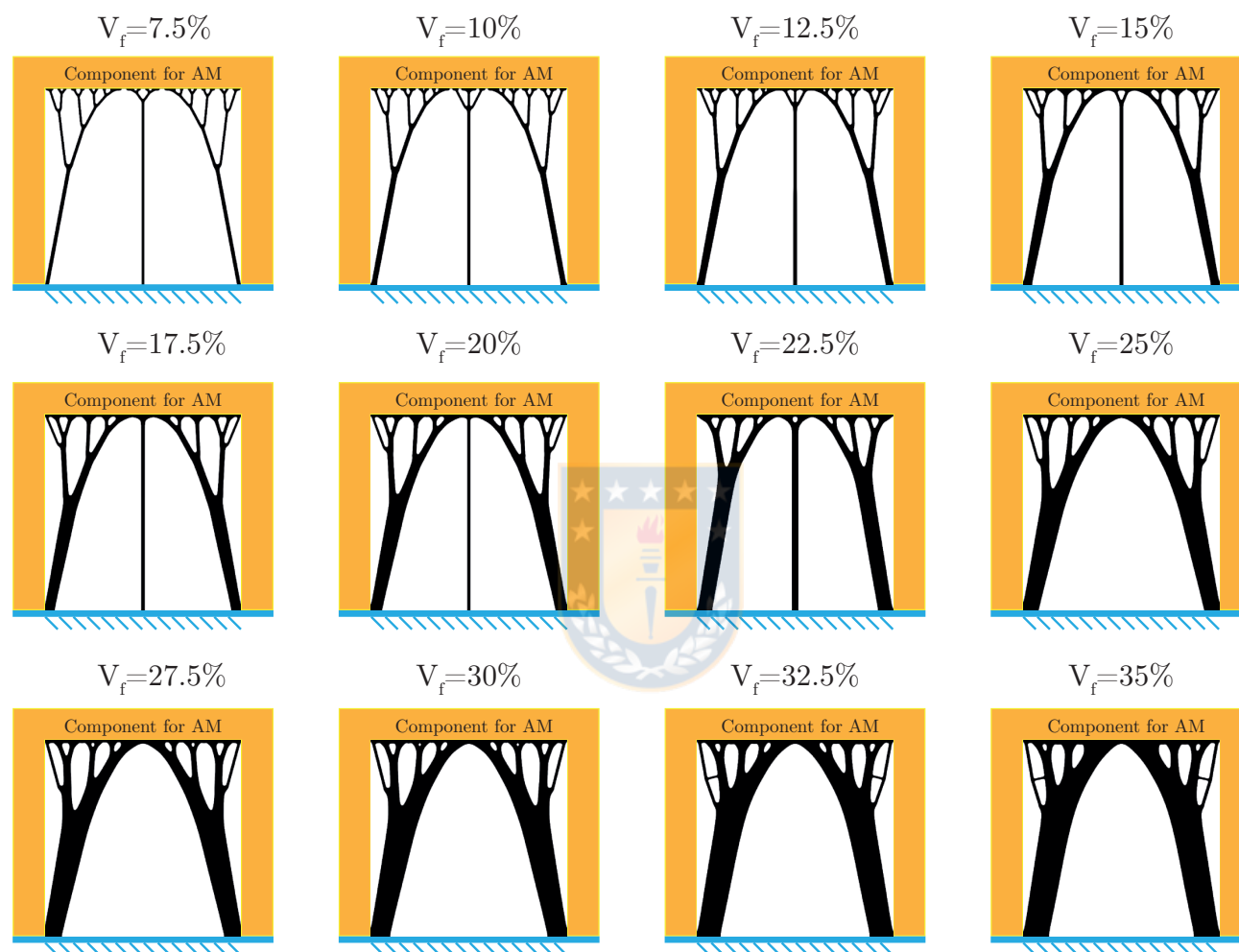


Figura 5.3: Soportes generados con distintas fracciones de volumen.

5.4 Efecto de la relación de aspecto del dominio

La relación de aspecto del dominio influye en las geometrías que se obtienen de la optimización. En la Figura 5.4 se muestran las geometrías obtenidas para distintas relaciones de aspecto. Como se puede observar, dominios con grandes alturas pueden presentar estructuras no deseadas como la barra horizontal que se observa en la Figura 5.4a. Mientras que dominios de gran anchura presentan una mayor cantidad de "árboles" para abarcar completamente la fuerza distribuida. Es importante conocer cómo se comporta en distintas relaciones de aspecto, ya que por ejemplo,

en el primer caso (Figura 5.4a) es posible que sea necesario incorporar una restricción de ángulo sobresaliente para evitar la barra horizontal que puede presentar problemas durante la impresión. Al aplicar la restricción de ángulos sobre esta estructura se obtiene el resultado que se presenta en la Figura 5.5b, donde se puede apreciar que esta restricción evita que se formen ese tipo de estructuras.

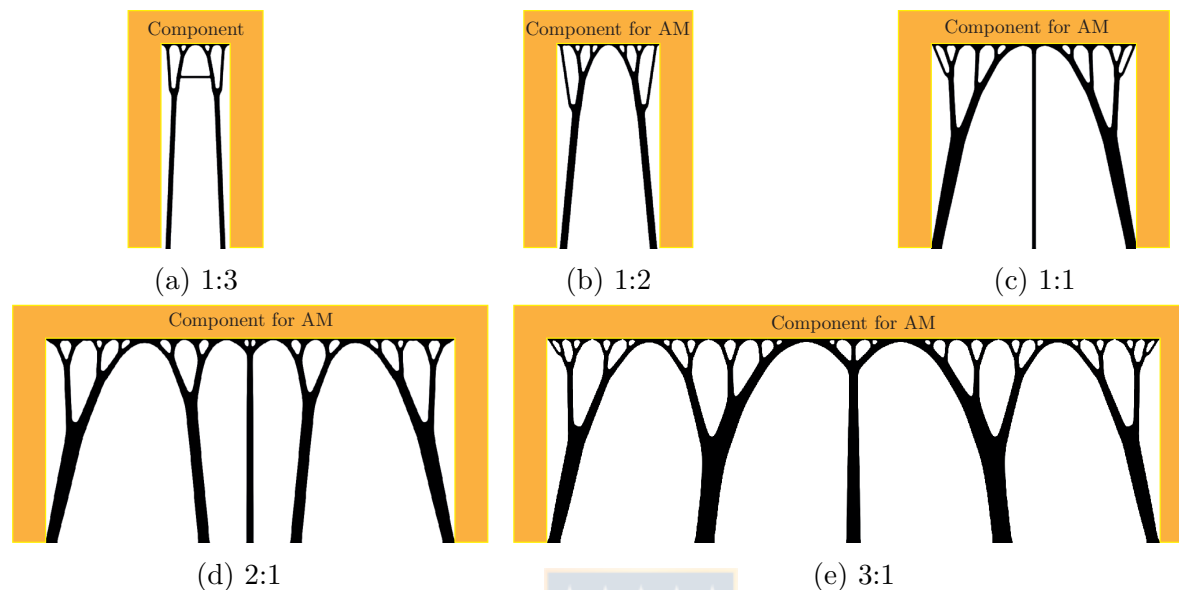


Figura 5.4: Soportes generados para diferentes relaciones de aspecto del espacio de diseño.



Figura 5.5: En a) soporte generado sin restricción de ángulo sobresaliente. En b) soporte generado con restricción de ángulo sobresaliente.

Hasta este punto, los resultados concuerdan perfectamente con los que se presentan en el trabajo de [Mezzadri et al., 2018]. Sin embargo, los soportes que se obtienen incluyendo solo la restricción de mínimo tamaño siguen presentando problemas como los que se muestran en la Figura 5.6, los cuales son:

- **Contacto entre el tronco y la pieza:** Como se puede observar en muchos de los soportes generados hasta el momento, el tronco de los soportes entra en contacto con la pieza que se desea imprimir, lo cual, puede dificultar la posterior remoción de estos. Por lo tanto, es necesario implementar un espacio entre el tronco de los soportes y la pieza, este espacio debe ser al menos mayor a la mínima separación entre miembros que se obtuvo en las pautas geométricas.

- **Espacio entre las ramas y la pieza:** Debido a que el soporte abarca toda la superficie de la estructuras sobresaliente, no existe una separación entre las ramas y la pieza. Esto puede dificultar el uso de herramientas como pinzas, y también es innecesario debido a que pueden haber pequeños espacios entre la pieza y el primer soporte, basta con que este espacio sea mayor a la mínima separación entre miembros y menor a la máxima separación entre bordes, los cuales, se obtuvieron de las pautas geométricas de la impresora.
- **Grandes relaciones de aspecto:** Como se explicó anteriormente, soportes estructurales con grandes relaciones de aspecto corren el riesgo de colapsar durante el proceso de impresión.
- **Grandes áreas de contacto:** Como se mencionó anteriormente, la estrategia a utilizar para facilitar la remoción de los soportes es reducir las áreas de contacto entre el soporte y la pieza. El soporte mostrado en la Figura 5.6 claramente no cumple con esta característica. Ya que como se puede observar las ramas tienden a expandirse al momento de entrar en contacto con la pieza.

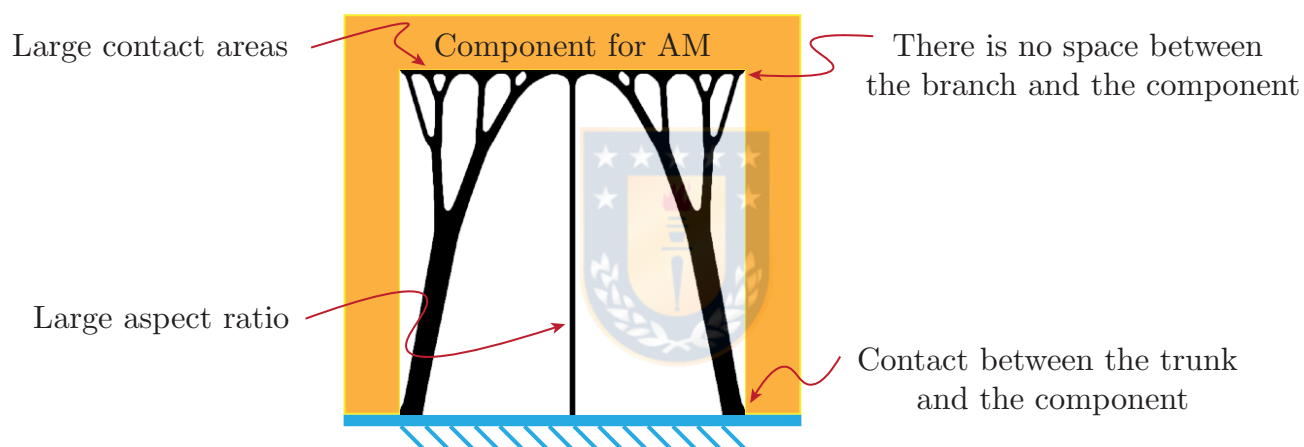


Figura 5.6: Problemas presentados con los soportes que solo incluyen restricción de tamaño mínimo.

5.5 Distancia entre los soportes y la pieza a imprimir

Para evitar el contacto entre el tronco de los soportes y la pieza que se desea imprimir, basta con evitar el empotramiento de las estructuras soportes en las cercanías de la pieza. Específicamente, solo se fijan los grados de libertad de los elementos que estén al menos a una distancia de 5 elementos de la pieza, lo cual es mayor a la mínima separación que puede haber entre 2 miembros. Mientras que para implementar un espacio entre las ramas y la pieza, basta con reducir el área en donde se impone la fuerza distribuida. De esta manera, el modelo de elementos finitos del problema de optimización queda planteado como se muestra en la Figura 5.7a. En donde existe una distancia de 10 elementos entre la pieza y la fuerza distribuida, y una distancia de 5 elementos entre la pieza y los grados de libertad fijos, obteniendo el soporte que se observa en la Figura 5.7b.



Figura 5.7: En a) formulación para crear espacio entre los troncos y las ramas con la pieza a imprimir. En b) resultado obtenido con el nuevo modelo.

5.6 Cambio lineal de tamaño mínimo

En la Figura 5.6 se puede observar la aparición de una columna en la mitad de la estructura sobresaliente. Ya que en la optimización no se consideran restricciones por pandeo, esta estructura es bastante óptima debido a que se ubica en el punto de mayor deflexión y se encuentra en un estado de compresión pura. Sin embargo, es posible que esta estructura no cumpla con la máxima relación de aspecto que se obtuvo de las pautas geométricas. Para evitar que eso suceda, se impone un tamaño mínimo en la base de los soportes que sea mayor que el tamaño mínimo en la punta de los soportes, específicamente, se impone un espesor mínimo de 1.0 [mm] en la base de la impresora, el cual, corresponde al espesor de la columna obtenida de la pauta geométrica que se usó para obtener la relación de aspecto óptima. Este valor decrece de forma lineal hasta llegar al mínimo espesor de pared (0.5 [mm]) en el punto de contacto.

En la Figura 5.8a se muestra el soporte que se obtiene al mantener un mínimo tamaño constante a lo largo de la estructura. Mientras que en la Figura 5.8b se observan los soportes obtenidos al aplicar un tamaño mínimo variable, con un espesor mínimo en la base de 1.0 [mm]. Si se incrementa aún más el espesor en la base de los soportes, por ejemplo, 2.0 [mm] en la base, se obtienen el soporte que se presenta en la Figura 5.8c, en donde se observa que desaparece la estructura del medio debido a que no cumple con la restricción de tamaño mínimo.

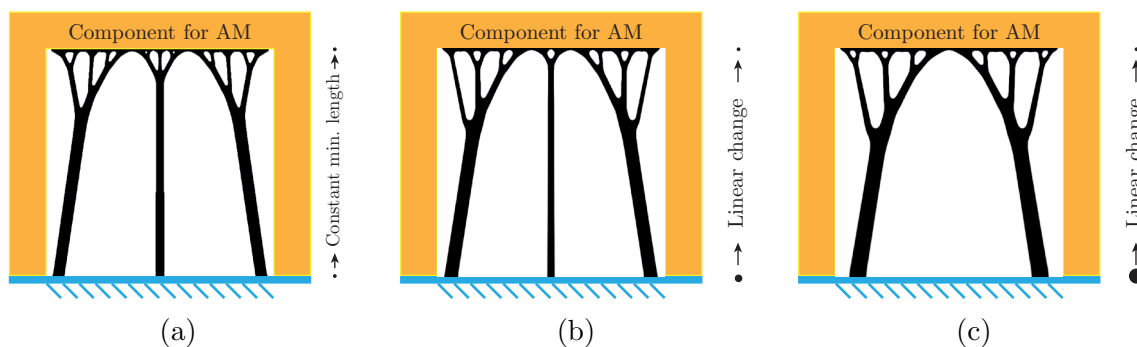


Figura 5.8: En a) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo constante. En b) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo que varía linealmente con un espesor de 1.0 [mm] en la base. En c) soporte generado con una restricción de tamaño mínimo que varía linealmente con un espesor de 2.0 [mm] en la base.

5.7 Restricción de máximo tamaño

El problema que aún mantienen los soportes que se han generado son las grandes áreas de contacto entre estas estructuras y la pieza. Para solucionar este problema se implementa la restricción de máximo tamaño de la misma manera que se implemento el mínimo tamaño, imponiendo una restricción de tamaño en la base de los soportes que decrece linealmente a medida que se acerca al punto de contacto. De esta forma se puede reducir las áreas de contacto sin generar estructuras con relaciones de aspecto muy grandes.

En la Figura 5.9a se observa el soporte que se obtiene al mantener tanto el mínimo tamaño como máximo tamaño constante a lo largo de los soportes. Si bien, este soporte no cumple con la restricción de relación de aspecto, tiene la ventaja que cada una de las estructuras que presenta están conectadas entre sí, asemejándose a una estructura entramada, lo cual, le da mayor rigidez ante fuerzas horizontales producidas por el avance del cabezal de deposición. Una característica muy importante que se aprecia al imponer la restricción de máximo tamaño es que las estructuras poseen una mayor cantidad de ramas, y cada rama presenta puntos de contacto con áreas pequeñas, lo cual, era el objetivo de aplicar esta restricción. En las Figuras 5.9b y 5.9c se muestran los resultados al aplicar un cambio lineal de mínimo tamaño y máximo tamaño, donde en ambos se presentan puntos de contacto con áreas pequeñas, pero con diferentes espesores en la base los soportes.

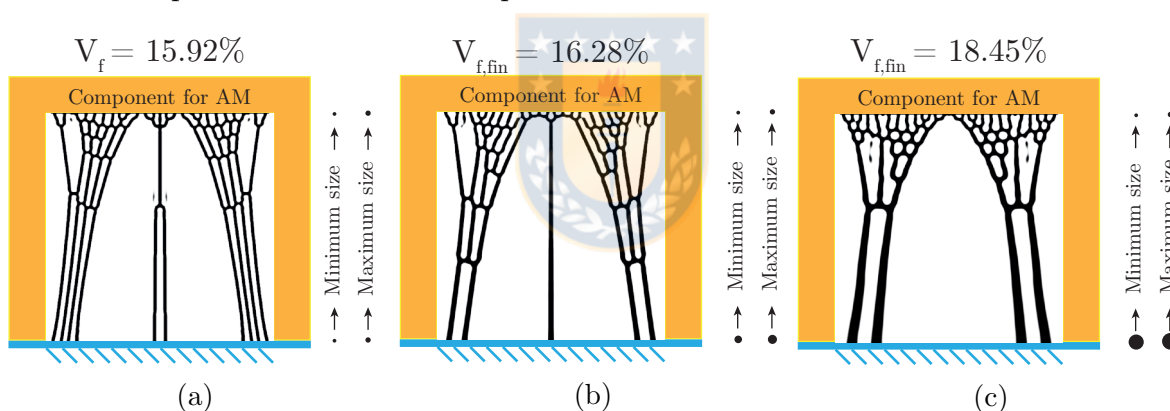


Figura 5.9: En a) soporte generado con restricción de máximo tamaño utilizando un filtro de tamaño constante. En b) soporte generado con restricción de tamaño máximo con un filtro que varía linealmente. En c) soporte generado con restricción de tamaño máximo con un filtro mayor también que varía linealmente.

Un detalle importante que se puede observar al utilizar esta restricción, es que a cada soporte de la Figura 5.9 se le impuso una restricción de volumen del 25%. Sin embargo, las estructuras finales presentaron un fracción de volumen mucho menor a la impuesta (arriba de cada figura se muestra el volumen final de los soportes). Esto se debe a que la restricción de máximo tamaño corresponde a una restricción local que consiste en introducir una cierta cantidad de vacío dentro de un región alrededor de un elemento, y es normal que llegue un punto en que el problema quede atrapado en un óptimo local en donde ya no se pueda modificar la forma de la estructura si no más bien los espesores de lo miembros que posee. Sin embargo, debido a que no existe una gran diferencia entre la restricción de tamaño mínimo y la restricción de tamaño máximo esta posibilidad de jugar con el espesor de la estructura no es posible, por lo cual, no se puede utilizar todo el material disponible. Para reducir las grandes diferencias entre

la fracción de volumen impuesta y la fracción de volumen final, se puede aumentar el tamaño máximo de los miembros, permitiendo que se pueda jugar más con el espesor de las estructuras. En la Figura 5.10 se pueden observar los soportes generados, en donde a cada uno se le impuso el mismo tamaño mínimo, pero con diferentes restricciones de tamaño máximo (ambos variando de forma lineal). Se aprecia como las fracciones de volumen son mucho más cercanas al valor que se impuso (25%). Otra estrategia que funciona bastante bien y se puede complementar con la mencionada anteriormente, es utilizar fracciones de volumen mayores a la que se deseen, dado que es de esperar que la fracción de volumen final sea menor.

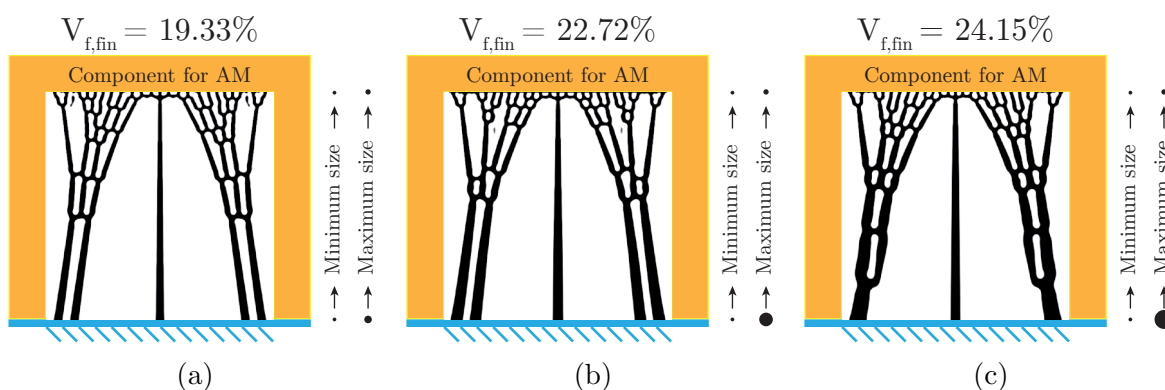


Figura 5.10: En a) soporte generado con una máximo tamaño de 5 elementos mayor al tamaño mínimo en la base. En b) soporte generado con una máximo tamaño de 10 elementos mayor al tamaño mínimo en la base. En c) soporte generado con una máximo tamaño de 15 elementos mayor al tamaño mínimo en la base.

5.8 Separación entre los puntos de contacto

Otro punto que puede ayudar a facilitar la remoción de los soportes es controlar la distancia entre los puntos de contacto. Como se pudo observar en las pautas geométricas, mientras no haya una distancia mayor a 2.0 [mm] entre los puntos de contacto, se considera que la calidad de la superficie es buena. Para implementar la separación entre los puntos de contacto se evalúan las siguientes 2 estrategias.

5.8.1 Mínima separación entre ramas

La restricción de separación mínima entre partes estructurales es una consecuencia de la restricción de máximo tamaño y se puede implementar utilizando la metodología propuesta en [Fernández et al., 2020]. Tal como se detalla en ese trabajo, dado las grandes cantidades de vacío que se introducen en el espacio de diseño, se pueden producir conflictos con las proyecciones del enfoque robusto, lo cual, puede afectar las uniones de ciertos miembros de la estructura. Por lo tanto, esta restricción solo se aplica en las primeras etapas de la optimización, específicamente, esta restricción se aplica hasta que el valor del coeficiente de penalización de la ecuación 2.2 alcance un valor de 1.5.

En la Figura 5.11 se muestran 2 soportes en los cuales se aplicó la restricción de mínima separación. En la Figura 5.11a se aplicó una separación mínima de 5 elementos en las base, separación que incrementa linealmente hasta alcanzar un valor de 10 elementos en el punto de contacto. Mientras que en la Figura 5.11b la mínima separación entre miembros aumenta hasta llegar a un valor de 20 elementos. Sin embargo, ninguna de estas restricciones se cumple en los puntos de contacto, esto debido principalmente a que esta restricción se aplica en las etapas iniciales de la optimización, mientras que durante las pruebas es posible apreciar que los puntos de contacto son las últimas estructuras en formarse.

Es importante destacar que aún así la restricción se cumple bastante bien en el resto de la estructura. Además, no existe una separación mayor a la máxima permitida. Por lo tanto, aunque no se pueda controlar la separación entre los puntos de contacto como se esperaba, las estructuras generadas siguen siendo una buena opción como soportes para la pieza que se desea imprimir.

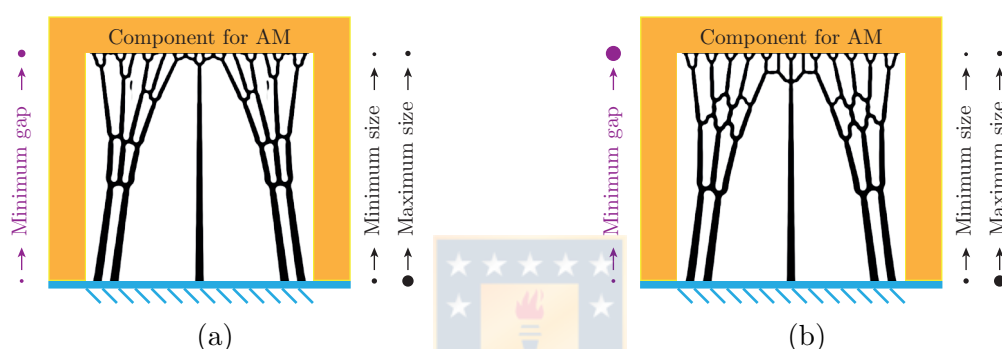


Figura 5.11: En a) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 10 elementos en el punto de contacto. En b) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 20 elementos en el punto de contacto.

5.8.2 Uso de fuerzas puntuales

Esta trabajo propone además otro enfoque para facilitar la remoción de los soportes con respecto a la pieza de interés. La idea es aplicar la fuerza distribuida en nodos distanciados según las recomendaciones recogidas de las pautas geométricas. De esta manera, el modelo de elementos finitos para la optimización queda planteado como se muestra en la Figura 5.12, en donde además de aplicar fuerzas puntuales, se implementan elementos sólidos y vacíos pasivos en las primeras filas de elementos, los elementos sólidos se ubican en los puntos donde se aplica la fuerza.

En la Figura 5.13a se muestra los resultados al implementar una separación de 10 elementos entre los puntos de contacto, mientras que en la Figura 5.13b se muestra el resultado al implementar una separación de 20 elementos. A diferencia de la estrategia anterior, se puede apreciar que la separación entre los puntos de contacto se cumple de manera perfecta en ambos casos. Además, tiene la ventaja de que son menos costosos computacionalmente, ya que solo es necesario utilizar la restricción de máximo tamaño.



Figura 5.12: Formulación del problema de optimización donde las fuerzas se aplican de forma puntual.



Figura 5.13: En a) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 10 elementos en el punto de contacto. En b) soporte generado con restricción de mínima separación que varía linealmente hasta llegar a una separación de 20 elementos en el punto de contacto.

5.9 Generación de soportes internos

Existen ciertas ocasiones en que no es posible imprimir los soportes empotrados a la base de la impresora, por lo cual, estos deben ser empotrados a la pieza de interés. El problema es que como se mencionó anteriormente, esto implica que el tronco de la estructura entre en contacto con la pieza, haciendo que se dificulte más su posterior extracción. Una estrategia para generar soportes internos (que se generan desde la misma pieza) es limitar el tamaño máximo en cada punto de contacto que posea el soporte con la pieza, sean las ramas o el tronco de la estructura.

En la Figura 5.14 se muestra la estrategia utilizada para generar los soportes internos. Esta consiste en limitar el tamaño máximo de la estructura tanto en la zona en que se aplica la fuerza distribuida, como también la zona en la que se fijan los grados de libertad. En el caso que se observa en la Figura 5.14 se restringe el tamaño máximo en la base de la estructura a 7 elementos, dicho tamaño máximo incrementa linealmente hasta llegar al 25% de la altura de los soportes, cuyo espesor máximo se restringe a 20 elementos. Luego, la restricción de máximo tamaño se mantiene constante hasta alcanzar el 60% de la altura de los soportes, para luego volver a decrecer linealmente hasta llegar nuevamente a un tamaño máximo de 7 elementos en

el punto de contacto.

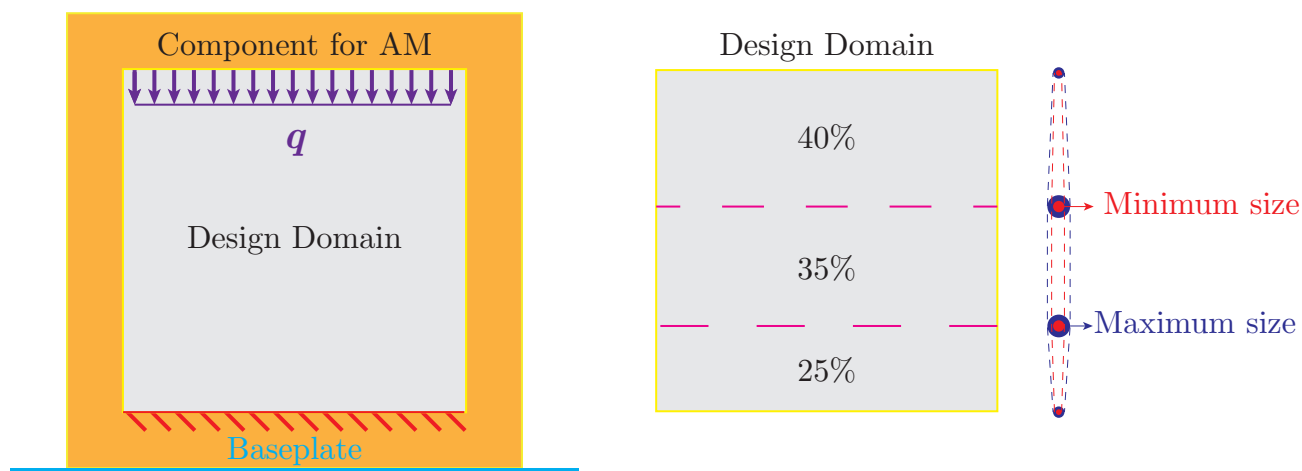


Figura 5.14: Modelo de elementos finitos utilizado para generar soportes internos.

Al aplicar esta estrategia junto con la restricción de mínima separación entre miembros mostrada anteriormente se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 5.15. En donde la única diferencia entre los 2 resultados que se muestran es la fracción de volumen utilizada. Esto debido a que puede ser necesario aumentar los puntos de contacto en la base de los soportes para obtener una buena rigidez y evitar posibles problemas durante la impresión.



Figura 5.15: En a) soporte interno generado con la restricción de mínima separación entre miembros con una fracción final de volumen del 16.68%. En b) soporte interno generado con la restricción de mínima separación entre miembros con una fracción final de volumen del 26.04%

En la Figura 5.16 se muestran los soportes internos obtenidos al utilizar la estrategia de fuerzas puntuales. Como se puede observar, para ambas estrategias se logra limitar las áreas de contacto tanto en donde se aplica la fuerza, como también en donde se fijan los grados de libertad.



Figura 5.16: En a) soporte interno generado utilizando fuerzas puntuales con una fracción final de volumen del 17.62%. En b) soporte interno generado utilizando fuerzas puntuales con una fracción final de volumen del 26.45%.

CAPÍTULO 6

Generación de soportes

Este capítulo tiene por objetivo validar la metodología propuesta en el capítulo anterior usando geometrías representativas de la realidad. Es decir, para un conjunto de piezas a imprimir, se diseñan estructuras soporte usando la optimización topológica retroalimentada con las pautas geométricas identificadas en los capítulos anteriores.

A continuación se detallan las geometrías escogidas para la validación final.

6.1 Geometrías representativas

Este trabajo identifica 4 geometrías representativas de la realidad, las que se muestran en la Figura 6.1. Ahí, se presenta un puente rectangular (Figura 6.1a), un puente semicircular (Figura 6.1b), un puente triangular (Figura 6.1c), y un puente triangular invertido (Figura 6.1d).

El puente rectangular de la Figura 6.1a presenta una gran superficie horizontal sin sustento mecánico, por lo que el material no puede ser depositado de forma precisa sin el uso de estructuras soporte. Notablemente, la superficie en conflicto está a una distancia constante desde la base. Por lo tanto, las pautas geométricas relevantes en este caso es la distancia máxima de puente y la relación de aspecto. Las dimensiones del espacio de diseño para la generación de soportes son 50 [mm] de ancho y de alto.

A diferencia del puente rectangular, el puente semicircular de la Figura 6.1b posee una superficie sin sustento mecánico que es curva, por lo tanto la distancia de esta al plato base es variable. Además, debido a la curvatura, la superficie crítica posee un ángulo de inclinación variable. Por lo tanto, las pautas geométricas relevantes en este caso son la distancia máxima de puente, la relación de aspecto que debe ser impuesta de forma variable dentro del dominio de diseño, y el ángulo mínimo de inclinación. El espacio de diseño circular posee una radio de 50 [mm].

El puente triangular de la Figura 6.1c presenta una gran superficie horizontal sin sustento mecánico que presenta un ángulo de inclinación constante, que es 30° , siendo menor al ángulo que determina la autosostenibilidad del diseño. Por lo tanto, las pautas geométricas relevantes en este caso son la distancia máximo de puente y la relación de aspecto, la que debe imponerse de forma variable a lo largo de todo el dominio de diseño. El ancho del espacio de diseño es de 100 [mm], mientras que la altura máxima que alcanza el espacio de diseño es de 29.8 [mm]. Finalmente, el espesor de las columnas del puente triangular son de 5 [mm].

Por último, el puente triangular invertido de la Figura 6.1d presenta una gran superficie horizontal sin sustento mecánico al igual que el puente circular, sin embargo, los soportes están empotrados a la pieza de interés, la cual, posee un ángulo de 45° . Por lo tanto, las pautas geométricas relevantes en este caso son la distancia máxima de puente y la relación de aspecto.

El ancho del espacio de diseño es de 100 [mm], mientras que la altura máxima que alcanza el espacio de diseño es de 50 [mm].

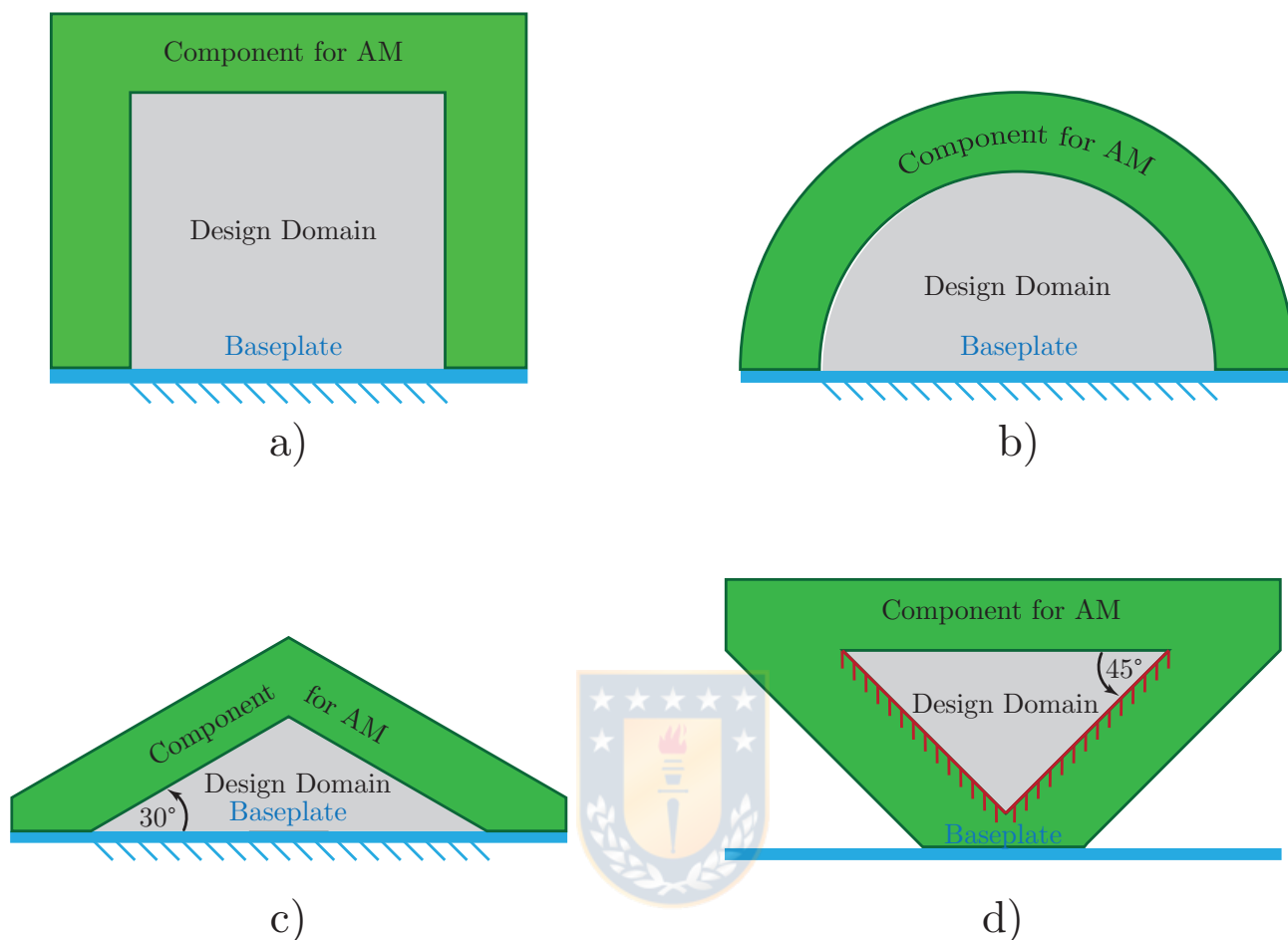


Figura 6.1: En la figura se muestran los 4 casos de estudios que se evalúan en este trabajo. a) Puente rectangular. b) Puente circular. c) Puente triangular. d) Puente triangular invertido.

En la Tabla 6.1 se muestran los valores elegidos para el control de longitud de los soportes, como lo son el tamaño mínimo y máximo impuesto en la base de la impresora definidos por $r_{\min, \text{Solid}, \text{ini}}$ y $r_{\max, \text{Solid}, \text{ini}}$, los cuales decrecen linealmente hasta un valor de tamaño mínimo y máximo definidos por $r_{\min, \text{Solid}, \text{fin}}$ y $r_{\max, \text{Solid}, \text{fin}}$. También, se muestra el valor de fracción de volumen impuesta (V_f) y la fracción de volumen obtenida al final de la optimización ($V_{f, \text{fin}}$). Finalmente, para cada uno de los casos que se muestra a continuación se impuso un espacio entre los puntos de contacto de 20 elementos finitos, los cuales corresponden a una distancia de 2.0 [mm].

6.1.1 Puente rectangular

En la Figura 6.2a se muestra la pieza y el respectivo espacio de diseño para la optimización topológica de los soportes para el caso del puente rectangular. En la Figura 6.2b se observa los soportes obtenidos utilizando la restricción de mínima separación entre miembros, mientras que en la Figura 6.2c se muestra el soporte generado utilizando fuerzas puntuales.

Tabla 6.1: Tamaño mínimo y máximo impuesto en los casos de estudio, y el valor de la fracción de volumen impuesta y obtenida al final de la optimización.

Caso de estudio	$r_{\min, \text{Solid}, \text{ini}}$	$r_{\min, \text{Solid}, \text{fin}}$	$r_{\max, \text{Solid}, \text{ini}}$	$r_{\max, \text{Solid}, \text{fin}}$	V_f	$V_{f, \text{fin}}$
6.2b	5	2.5	7.5	3.6	30%	20.7%
6.2c	5	2.5	7.5	3.6	25%	19.1%
6.3b	5	2.5	7.5	3.6	20%	14.0%
6.3c	5	2.5	7.5	3.6	20%	16.2%
6.3d	5	2.5	7.5	3.6	20%	12.9%
6.4b	4	2.5	6	3.6	20%	18.6%
6.4c	4	2.5	6	3.6	20%	19.1%
6.4d	4	2.5	6	3.6	20%	14.5%
6.5b	5	2.5	7.5	3.6	20%	15.3%
6.5c	5	2.5	7.5	3.6	20%	17.3%

Como se mencionó en el capítulo anterior la restricción de mínima separación entre miembros no se cumple en la interfaz soporte - pieza, sin embargo, los contactos que se aprecian en la Figura 6.2b cumple con poseer pequeñas áreas de contacto. Por otro lado, la estrategia de aplicar fuerzas puntuales cumple perfectamente con la mínima separación impuesta entre los puntos de contacto, además de poseer pequeñas áreas de contacto.

Por otro lado, en el caso del soporte generado utilizando fuerzas puntuales se obtiene un soporte que respeta la distancia entre los puntos de contacto. Cabe destacar que esta estructura posee bastantes miembros con ángulos de inclinación demasiado bajos, sin embargo, la longitud de estos es tan pequeña que no debería tener problemas para imprimirse. Esto último se puede observar claramente en las Figuras 6.2d y 6.2e en donde se muestran las estructuras impresas correctamente.

6.1.2 Puente circular

Para el caso del puente de circular se utiliza el espacio de diseño que se muestra en la Figura 6.3a. Debido a que la altura entre la superficie que se desea sostener y la base de la impresora no es constante se requiere una pequeña modificación, la cual consiste en disminuir el valor de $r_{\min, \text{Solid}, \text{ini}}$ a medida que se va alejando del centro de la pieza. Otro punto importante es que la fuerza se aplica solo en la superficie cuya pendiente posee un ángulo menor a 50° , que tal como se determinó con las pautas geométricas, corresponde al ángulo en que se obtiene un mala calidad superficial.

En las Figuras 6.3b y 6.3c se muestran los soportes obtenidos al utilizar la restricción de mínima separación entre miembros y al utilizar fuerzas puntuales respectivamente, en el soporte generado con restricción de mínima separación se puede observar una estructura similar a un techo, el cual esta apegado a la pieza que se desea imprimir. Esto es claramente un problema debido a que implica grandes áreas de contacto, lo que dificulta mucho su posterior extracción. Sin embargo, esta estructura cumple con las restricciones impuestas a la optimización, por lo que la forma más simple de remover esta estructura es en un post-procesamiento. La estrategia consiste en aumentar la cantidad de elementos utilizados en el espacio de diseño, para después

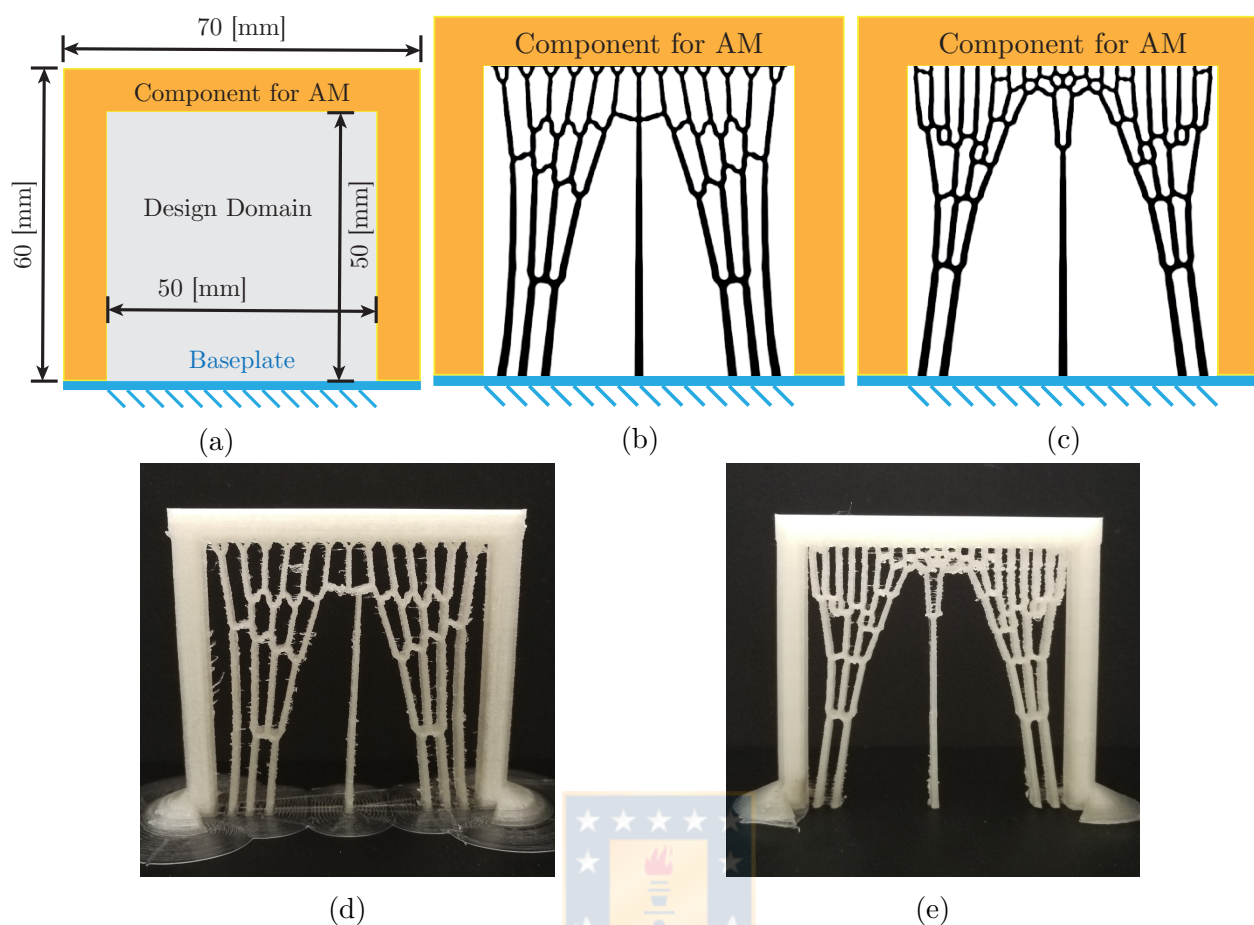


Figura 6.2: En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando una restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) y e) los soportes impresos en 3D.

remover esta estructura y volviendo a la cantidad de elementos que se necesitaban originalmente, obteniendo el soporte que se muestra en la Figura 6.3d. Los soportes generados utilizando fuerzas puntuales y la estructura de soportes generada utilizando una restricción de separación mínima más un post-procesamiento son impresas como se pueden observar en las Figuras 6.3e y 6.3f respectivamente.

6.1.3 Puente triangular

Para el caso del puente triangular es necesario realizar la misma modificación mencionada en el caso anterior, reducir el valor de $r_{\min, \text{Solid}, \text{ini}}$ a medida que se va alejando del centro de la pieza. Debido a que la altura de la pieza es menor que a los otros casos de estudio, se redujo el valor de tamaño mínimo impuesto en la base de la impresora tal como se puede observar en la Tabla 6.1.

Al igual que en caso anterior, se forma una estructura similar a un techo arriba de los soportes como se puede observar en la Figura 6.4b, la cual, nuevamente es removido en un post-procesamiento obteniendo el soporte mostrado en la Figura 6.4d.

Tabla 6.2: Comparación de masa utilizada y tiempos de impresión de los soportes generados con TO y los soportes generados utilizando el software Cura de Ultimaker.

Componente	Masa total (Masa de la pieza sin soportes)	Tiempo de impresión	Reducción de masa con TO
Rectangular bridge (Cura)	8 g (5 g)	6 h 45 min	-
Rectangular bridge (TO)	7 g (5 g)	6 h 26 min	12.5 (%)
Circular bridge (Cura)	9 g (5 g)	7 h 43 min	-
Circular bridge (TO)	8 g (5 g)	7 h 45 min	11.1 (%)
Triangular bridge (Cura)	6 g (3 g)	4 h 32 min	-
Triangular bridge (TO)	5 g (3 g)	4 h 57 min	16.7 (%)
Inv. triangular bridge (Cura)	11 g (7 g)	8 h 25 min	-
Inv. triangular bridge (TO)	9 g (7 g)	7 h 28 min	18.2 (%)

Tanto en el puente circular como en el puente triangular se puede observar una clara ventaja al utilizar la estrategia de fuerzas puntuales, ya que como se puede observar en los soportes mostrados en las Figura 6.3c y 6.4c, estos no necesitan un post-procesamiento. Nuevamente, estas 2 estructuras, los soportes generados con fuerzas puntuales y los generados utilizando una restricción de separación más un post-procesamiento son impresos y se pueden observar en las Figuras 6.4e y 6.4f respectivamente.

6.1.4 Puente triangular invertido

El último caso de estudio corresponde al puente triangular invertido, cuyo espacio de diseño se muestra en la Figura 6.5a. Para los soportes optimizados con restricción de mínima separación entre miembros se puede observar ciertos puntos de contacto en que no se respeta el tamaño máximo impuesto, sin embargo, esto se puede solucionar aumentando el valor del coeficiente de penalización q que se muestra en la ecuación 3.9. Por otro lado, utilizando la restricción de fuerzas puntuales que se observa en la Figura 6.5c no hubo problemas y cumple con la característica de poseer pequeñas áreas de contacto.

Un punto importante a destacar es que en este último caso de estudio los soportes generados corresponden a soportes interno. Por tal motivo, para facilitar su remoción se puede aplicar la estrategia mencionada en el capítulo anterior para reducir las áreas de contacto en todos los puntos de contacto que hay entre los soportes y la pieza. Los soportes se imprimieron sin problemas como se puede apreciar en las Figuras 6.5e y 6.5d.

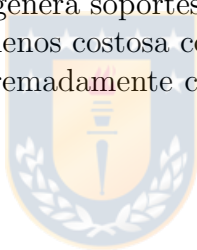
Para apreciar la reducción de material lograda por los soportes generados con optimización topológica, se extraen los datos de cantidad de material utilizado y tiempo de impresión de los componentes con cada uno de los soportes generados con TO y los generados por el software Cura de Ultimaker. En la tabla 6.2 se muestran los valores obtenidos. Solo se comparan los soportes obtenidos con optimización topológica utilizando fuerzas puntuales debido a que demostraron un mejor control entre los puntos de contacto comparado con la estrategia de utilizar una restricción de separación mínima.

6.2 Caso con geometría compleja

Las cuatros geometrías representativas mostradas anteriormente son casos son bastante simples comparado con las piezas que se suelen fabricar por impresión 3D. Por tal motivo, para demostrar las capacidades del método propuesto se añade un último caso que corresponde a la pieza que se puede observar en la Figura 6.6. En donde se muestran las distintas zonas utilizadas como espacio de diseño para la generación de soportes con optimización topológica.

Para cada uno de los espacios de diseño se generaron soportes utilizando las 2 estrategias propuestas obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 6.7a para los soportes generados utilizando un restricción de separación entre miembros y en la Figura 6.7b para los soportes generados utilizando fuerzas puntuales. Nuevamente, los resultados muestran que el método de fuerzas puntuales consigue una mejor separación entre los puntos de contacto en comparación con la soportes generados con una restricción de separación mínima. Los soportes generados para este último caso son impresos y se pueden observar en la Figuras 6.7c y 6.7d.

Estos 5 casos de estudio muestran que la estrategia de utilizar una restricción de separación mínima entre miembros no es lo suficientemente precisa para controlar la distancia entre los puntos de contacto, además de ser bastante costosa computacionalmente y en muchos casos es necesario realizar un post-procesamiento al diseño final. Por otro lado, utilizar fuerzas puntuales en vez de utilizar una fuerza distribuida genera soportes con una gran precisión en la distancia entre los puntos de contacto, es mucho menos costosa computacionalmente y no requiere post-procesamiento incluso en geometrías extremadamente complejas con la mostrada en la Figura 6.6.



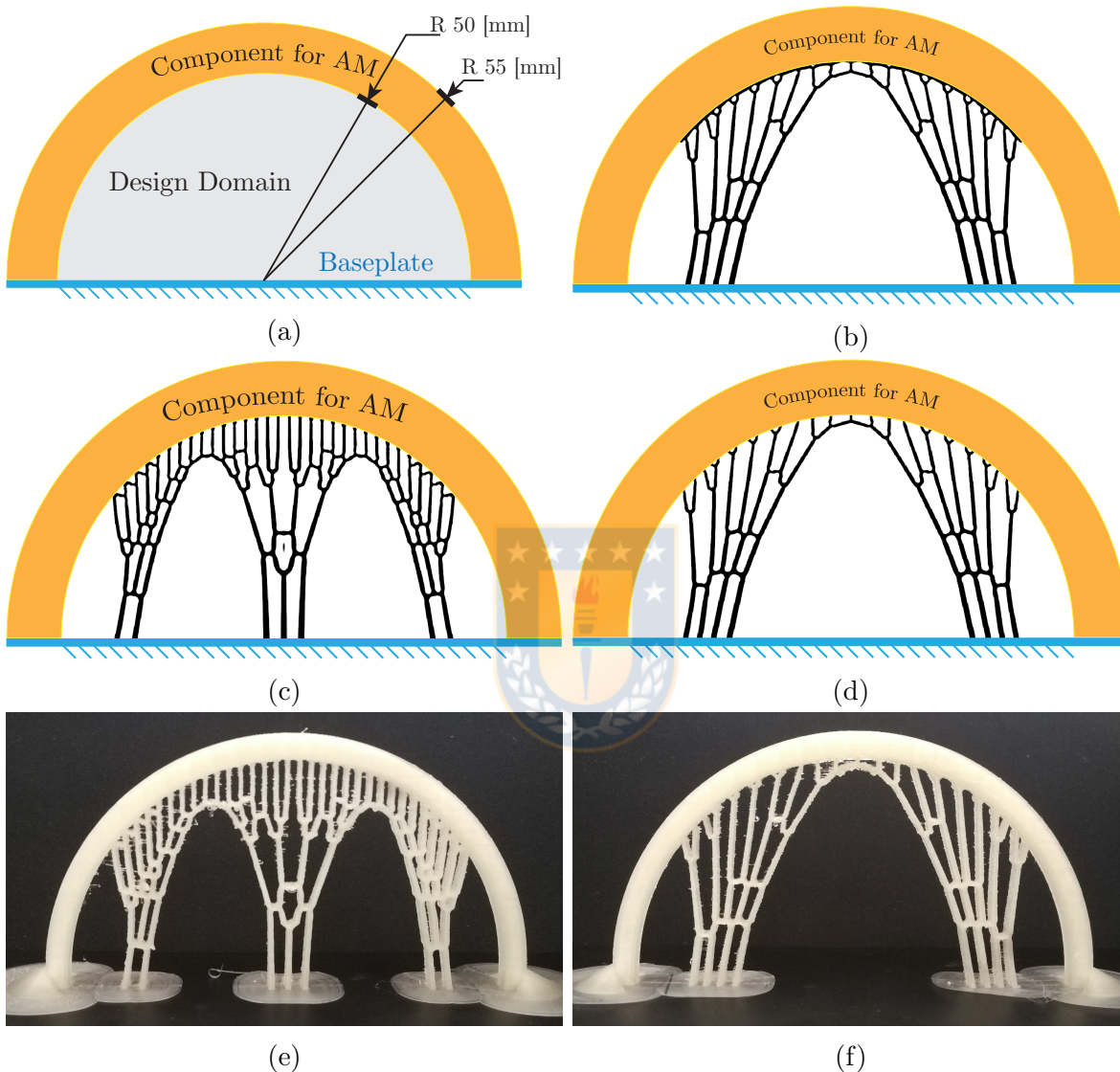


Figura 6.3: En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando la restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) soportes obtenidos al aplicar un post-procesamiento a los soportes obtenidos con restricción de mínima separación entre miembros. En e) y f) los soportes impresos en 3D.

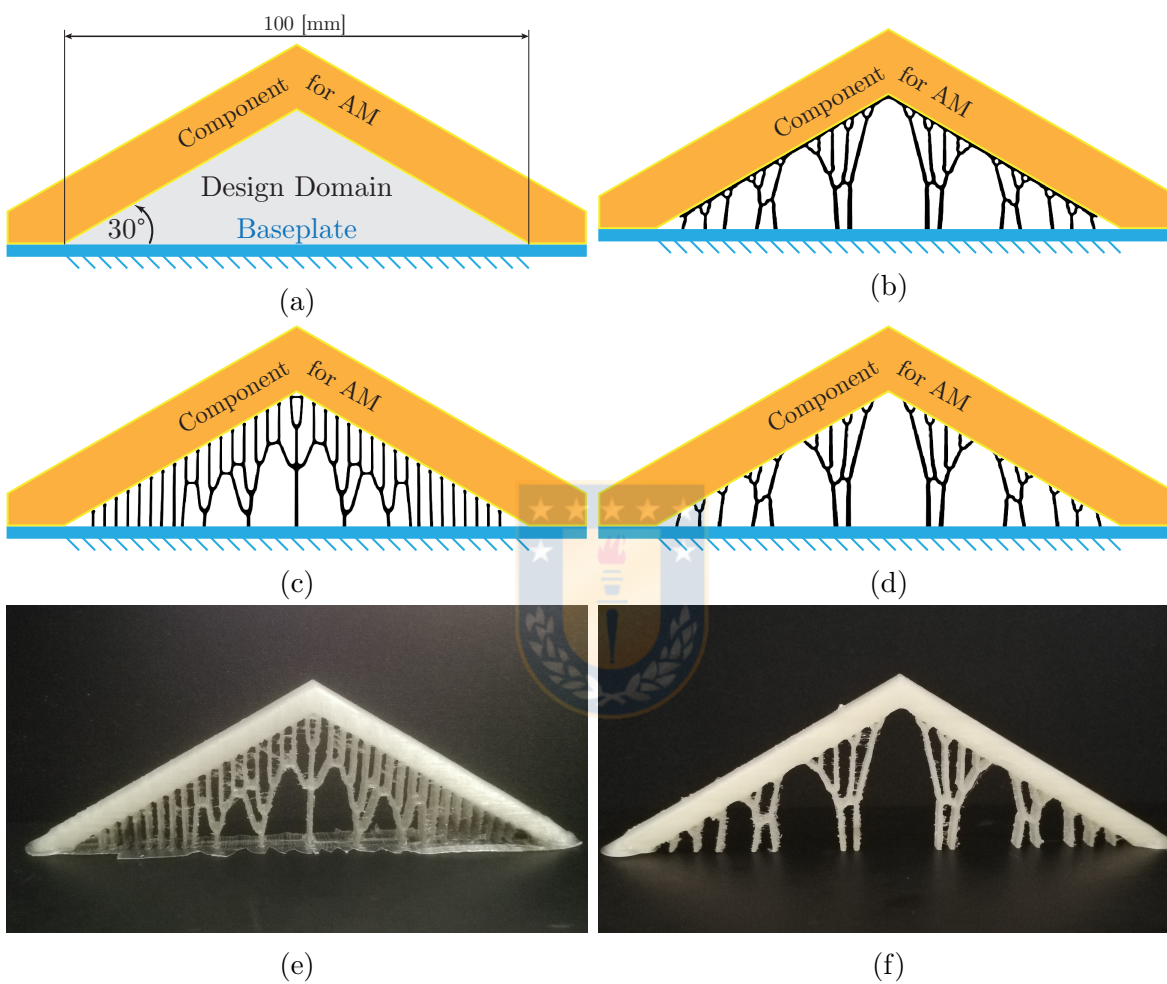


Figura 6.4: En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando la restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) soportes obtenidos al aplicar un post-procesamiento a los soportes obtenidos con restricción de mínima separación entre miembros. En e) y f) los soportes impresos en 3D.

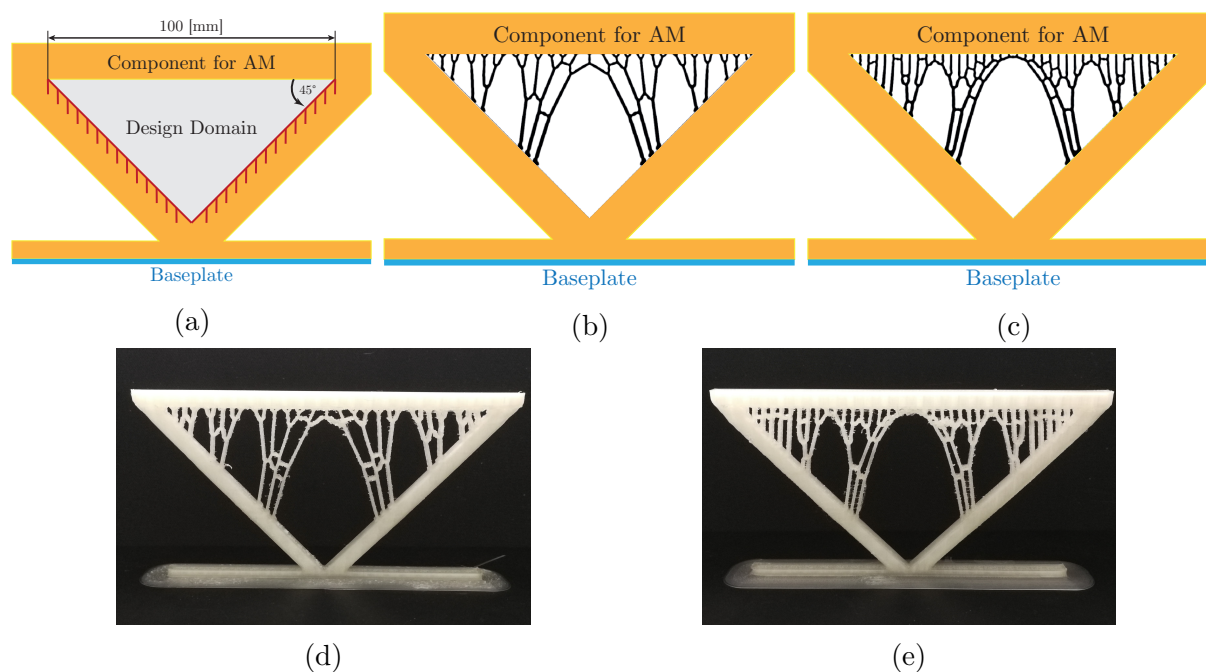


Figura 6.5: En a) espacio de diseño asignado para la generación de soportes. En b) soportes generados utilizando una restricción de mínima separación entre miembros. En c) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En d) y e) los soportes impresos en 3D.

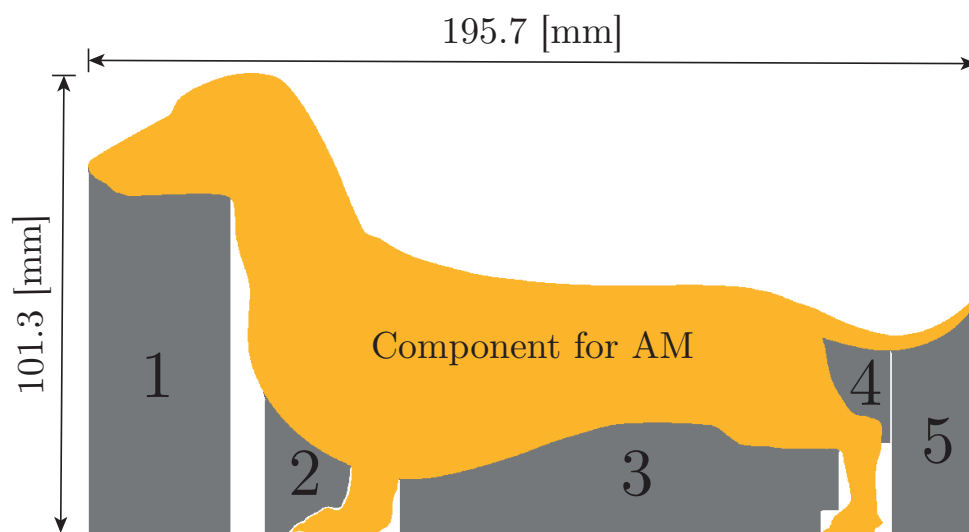


Figura 6.6: En la figura se muestra las diferentes zonas que se utilizan como espacio de diseño para la generación de soportes.

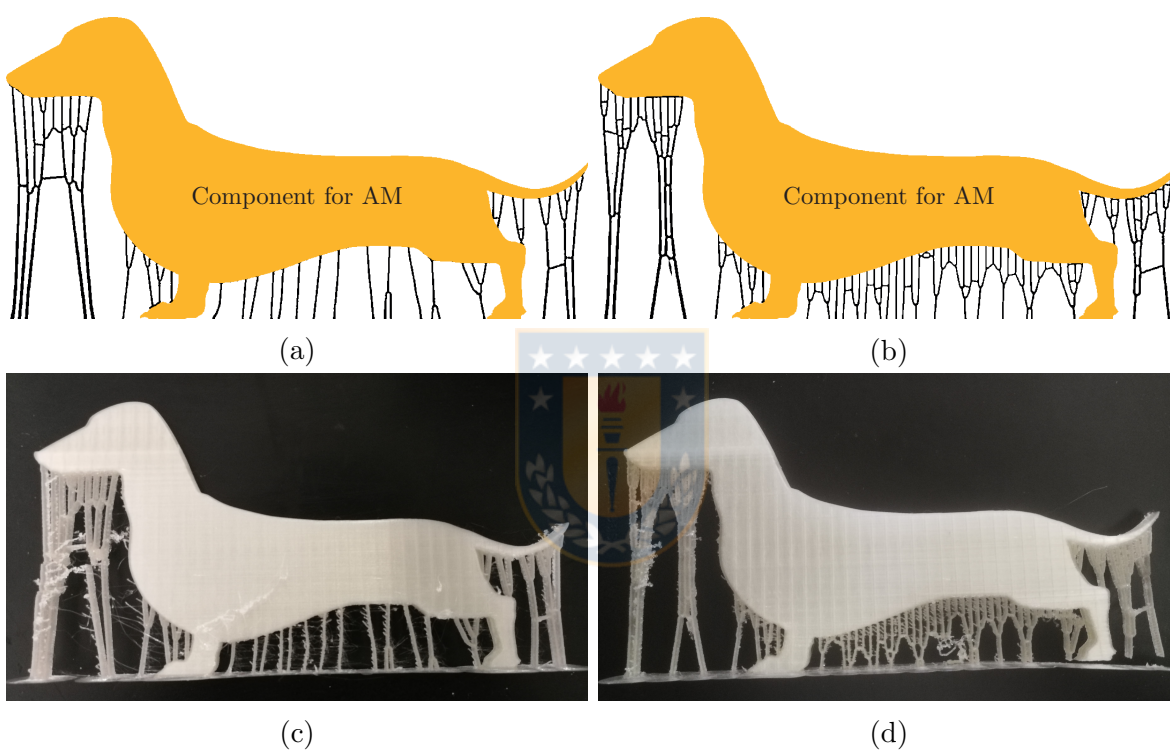


Figura 6.7: Soportes generados con optimización topológica. En a) soportes generados utilizando restricción de separación mínima. En b) soportes generados utilizando fuerzas puntuales. En c) y d) los soportes impresos.

CAPÍTULO 7

Conclusiones y perspectivas

7.1 Conclusiones

El uso de estructuras de soportes en la manufactura aditiva presenta distintas ventajas según el proceso de impresión 3D que se utilice, como la disipación de calor o darle una mayor rigidez a la estructura durante el proceso de impresión. Sin embargo, implica un mayor uso de material, mayores costos y tiempos de impresión, y finalmente se convierten en basura. Estas ventajas y desventajas se pueden mejorar utilizando la optimización topológica como herramienta de diseño para las estructuras de soporte. Este trabajo generó soportes mediante TO utilizando distintas restricciones para la manufactura aditiva, de manera de poder generar soportes eficientes, que se pueden soportar a si mismos y que poseen pequeñas áreas de contacto que facilitan su posterior remoción. De la aplicación de estas restricciones en el diseño de los soportes y la fabricación de estos se pueden obtener la siguientes conclusiones.

1. Incluir la restricción de tamaño máximo en la generación de soportes permite reducir el área de contacto de los soportes, lo que facilita su posterior remoción.
2. Se pueden imponer restricciones de tamaño mínimo y tamaño máximo que varían a lo largo del espacio de diseño, esto permite generar soportes que con un grosor mayor en la base de la impresora, lo cual, le da una mayor rigidez a los soportes durante el proceso de impresión manteniendo el mínimo contacto con la superficie sobresaliente.
3. Utilizar fuerzas puntuales en vez del enfoque tradicional de utilizar una fuerza distribuida para generar soportes con optimización topológica, permite controlar de manera precisa la distancia entre los puntos de contacto. Además, se necesita de un menor costo computacional en comparación con los soportes obtenidos utilizando una restricción de separación mínima, la cual, no es lo suficientemente precisa y en ciertos casos necesita de un post-procesamiento.
4. Los soportes generados con TO siguiendo las pautas geométricas de la impresora Ultimaker S2⁺ son capaces de sostenerse a si mismos como también a la superficie sobresaliente. Al mismo tiempo estos soportes ocupan menos material que los generados por el software comercial Cura, son óptimos desde el punto de vista de la rigidez mecánica y presentan pequeñas áreas de contacto que facilitan su posterior remoción.

Dentro de las perspectivas más interesantes de este trabajo, es la generación de soportes con TO en 3D, lo cual, no es difícil debido a que los códigos con las respectivas restricciones utilizadas en este trabajo están disponibles. Sin embargo, se requieren de nuevas pautas geométricas y una mayor capacidad computacional para llevar a cabo las simulaciones.

REFERENCIAS

- [Alexander et al., 1998] Alexander, P., Allen, S., and Dutta, D. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 30(5):343–356.
- [All3DP, 2020] All3DP (2020). 10 Best 3D Printer Test Print Models.
- [Andrade, 2018] Andrade, J. (2018). BMW has created one million 3D-printed parts in the last eight years. Section: Automotive.
- [Autodesk, 2020] Autodesk (2020). Meshmixer.
- [Bendsøe, 1989] Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, 1(4):193–202. Publisher: Springer.
- [Bendsoe and Kikuchi, 1988] Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Publisher: Elsevier.
- [Bendsoe and Sigmund, 2013] Bendsoe, M. P. and Sigmund, O. (2013). *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media.
- [Chen et al., 2013] Chen, Y., Li, K., and Qian, X. (2013). Direct Geometry Processing for Tele-fabrication. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 13(4). Publisher: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [DesktopMetal, 2020] DesktopMetal (2020). Separable Supports™ for easy post-processing.
- [Duda and Raghavan, 2016] Duda, T. and Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29):103–110.
- [Eduardo Fernández, 2020] Eduardo Fernández (2020). *Topology Optimization Including Additive Manufacturing Constraints*. Doctoral Thesis, Université de Liège, Belgium.
- [Feng et al.,] Feng, R., Li, X., Zhu, L., Thakur, A., and Wei, X. An Improved Two-Level Support Structure for Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67:101972. Publisher: Elsevier.
- [Fernández et al., 2019] Fernández, E., Collet, M., Alarcón, P., Bauduin, S., and Duysinx, P. (2019). An aggregation strategy of maximum size constraints in density-based topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(5):2113–2130.
- [Fernández et al.,] Fernández, E., Koppen, S., Kumar, P., Alarcón, P., Bauduin, S., and Duysinx, P. Length scale control, overhang constraints, and building orientation in topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*, page 23.
- [Fernández et al., 2020] Fernández, E., Yang, K.-k., Koppen, S., Alarcón, P., Bauduin, S., and Duysinx, P. (2020). Imposing minimum and maximum member size, minimum cavity size, and minimum separation distance between solid members in topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 368:113157.
-

- [Formlabs, 2020] Formlabs (2020). Design specifications for 3D models (Form 2).
- [Guest et al., 2004] Guest, J. K., Prévost, J. H., and Belytschko, T. (2004). Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(2):238–254. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/nme.1064>.
- [Jiang et al., 2018] Jiang, J., Stringer, J., Xu, X., and Zhong, R. Y. (2018). Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(10):961–969. Publisher: Taylor & Francis.
- [Kuo et al., 2018] Kuo, Y.-H., Cheng, C.-C., Lin, Y.-S., and San, C.-H. (2018). Support structure design in additive manufacturing based on topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(1):183–195.
- [Liu, 2021] Liu, K. (2021). Top3dSTL_v3.
- [Markforged, 2020] Markforged (2020). 3D Printer Types & Technologies.
- [Mezzadri et al., 2018] Mezzadri, F., Bouriakov, V., and Qian, X. (2018). Topology optimization of self-supporting support structures for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21:666–682.
- [Schmit and Fleury, 1980] Schmit, L. A. and Fleury, C. (1980). Structural synthesis by combining approximation concepts and dual methods. *AIAA Journal*, 18(10):1252–1260.
- [Siber, 2018] Siber, B. (2018). 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained.
- [Sigmund, 2009] Sigmund, O. (2009). Manufacturing tolerant topology optimization. *Acta Mechanica Sinica*, 25(2):227–239. Publisher: Springer.
- [Sigmund and Maute, 2013] Sigmund, O. and Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6):1031–1055. Publisher: Springer.
- [Sigmund and Petersson, 1998] Sigmund, O. and Petersson, J. (1998). Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. *Structural optimization*, 16(1):68–75. Publisher: Springer.
- [Strano et al., 2013] Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., and Evans, K. E. (2013). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9):1247–1254.
- [Svanberg, 1987] Svanberg, K. (1987). The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 24(2):359–373. Publisher: Wiley Online Library.
- [Ultimaker, 2020] Ultimaker (2020). Ultimaker Cura: software de impresión 3D potente y fácil de usar | Ultimaker.
- [Van Lieshout, 2020] Van Lieshout, L. (2020). STL (file format). Page Version ID: 994388166.

- [Vanek et al., 2014] Vanek, J., Galicia, J. a. G., and Benes, B. (2014). Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication. *Computer Graphics Forum*, 33(5):117–125. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cgf.12437>.
- [Wang et al., 2011] Wang, F., Lazarov, B. S., and Sigmund, O. (2011). On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(6):767–784. Publisher: Springer.
- [Wholers et al., 2020] Wholers, T. T., Campbell, R. I., Diegel, O., Hutt, R., and Kowen, J. (2020). *Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing: Global State of the Industry*. English. Wohlers Associates, Inc. isbn.
- [Xu et al., 2010] Xu, S., Cai, Y., and Cheng, G. (2010). Volume preserving nonlinear density filter based on heaviside functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(4):495–505. Publisher: Springer.
- [Zhou et al., 2019] Zhou, M., Liu, Y., and Lin, Z. (2019). Topology optimization of thermal conductive support structures for laser additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 353:24–43. Publisher: Elsevier.



BIBLIOGRAFÍA

Bendsoe and Sigmund (2013)
Topology optimization: theory, methods and applications.
Springer Science and Business Media.

Fernández E. (2020)
Topology Optimization Including Additive Manufacturing Constraint.
Ph.D. thesis. Liege, University of Liege, Department of mechanical engineering.

