

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“Diseño, modelización mecánica y fabricación de piezas
funcionales obtenidas mediante técnicas de fabricación aditiva”**

Autor:

D. Rubén Pascual Serra

Dirigido por:

Dr. Octavio Ángel Fenollar Gimeno

Diciembre 2020

RESUMEN

“Diseño, modelización mecánica y fabricación de piezas funcionales obtenidas mediante técnicas de fabricación aditiva”

En este trabajo de fin de grado se pretende desarrollar una metodología que sirva para poder estudiar el comportamiento mecánico de piezas funcionales obtenidas mediante técnicas de fabricación aditiva, más conocido como impresión 3D. Esta idea surge de la dificultad que se tiene en la actualidad para realizar estos estudios ya que muy pocos softwares incluyen herramientas específicas dedicadas a la simulación con estos diseños.

Para lograr este objetivo, se pretende replicar la pieza fabricada con esta técnica en un software de CAD, en este caso, SolidWorks, en su versión de 2019; creando diferentes modelos variando la estructura interna según diferentes patrones y porcentajes de relleno. Tras esto, se realizarán simulaciones mediante un modelo FEM donde se podrá observar el comportamiento mecánico de cada uno de los prototipos.

Se ha seleccionado un calzo para vehículos como pieza funcional ya que se ha encontrado interesante dado que no tiene una geometría excesivamente compleja que dificulte las simulaciones y se puede encontrar un estado tensional interesante ya que las cargas se van a encontrar distribuidas en una superficie curva. Además, la selección de esta pieza como base de los prototipos permitirá poder variar las condiciones de las cargas, jugando con las pendientes y la masa del vehículo. Con esto se podrá obtener una optimización de esta pieza en concreto, que será extrapolable a cualquier otra pieza funcional.

Durante el desarrollo del trabajo, se ha podido comprobar que patrones demasiado complejos o porcentajes de relleno demasiado elevados imposibilitan la validez de esta metodología puesto que los simuladores no son capaces de operar con la cantidad de nodos y grados de libertad que se generan. Sin embargo, se ha podido demostrar que para patrones y rellenos más sencillos es un método válido puesto que permitirá al usuario la optimización de su diseño previo a la impresión.

SUMMARY

“Design, mechanical modeling and manufacture of functional pieces obtained through additive manufacturing techniques”

This final degree project aims to develop a methodology that serves to study the mechanical behavior of functional pieces obtained through additive manufacturing techniques, better known as 3D printing. This idea arises from the current difficulty in conducting these studies, since very few software include specific tools focused on simulation with these designs.

In order to achieve this objective, it is intended to replicate the piece manufactured with this technique in a CAD software, in this case, SolidWorks, in its 2019 version; creating different models by varying the internal structure according to different patterns and filling percentages. After this, simulations will be carried out using a FEM model where the mechanical behavior of each one of the prototypes can be observed.

A vehicle chock has been selected as a functional piece since it has been found interesting since it does not have an excessively complex geometry that makes simulations difficult and an interesting tension state can be found since the loads are going to be distributed in a curved surface . In addition, the selection of this piece as the basis of the prototypes will allow to vary the load conditions, playing with the slopes and the mass of the vehicle, with this it will be possible to obtain an optimization of this particular piece, which will be extrapolated to any other functional piece.

During the development of the project, it has been found that patterns that are too complex or filling percentages that are too high make the validity of this methodology impossible since the simulators are not capable of operating with the number of nodes and degrees of freedom that are generated. However, it has been shown that for simpler patterns and fillings it is a valid method since it will allow the user to optimize their design prior to printing.

RESUM

“Disseny, modelització mecànica i fabricació de peces funcionals obtingudes amb tècniques de fabricació additiva.”

En aquest treball de fi de grau es pretén desenvolupar una metodologia que servisca per a poder estudiar el comportament mecànic de peces funcionals obtingudes mitjançant tècniques de fabricació additiva, més conegut com a impressió 3D. Aquesta idea sorgeix de la dificultat que es té en l'actualitat per a realitzar aquests estudis, ja que molt pocs softwares inclouen ferramentes específiques dedicades a la simulació amb aquests dissenys.

Per aconseguir aquest objectiu, es pretén replicar la peça fabricada amb aquesta tècnica en un software de CAD, en aquest cas, SolidWorks, en la seua versió 2019; creant diferents models variant l'estructura interna segon diferents patrons i percentatge de farcit. Després, es realitzaran simulacions mitjançant un model FEM on es podrà observar el comportament mecànic de cada u dels prototips.

S'ha seleccionat un calce per a vehicles com a peça funcional perquè s'ha encontrat interessant perquè no té cap geometria excessivament complexa que dificulte les simulacions i es pot encontrar un estat tensional interesant, ja que les càrregues es van a encontrar distribuïdes en una superfície corba. A més, la selecció d'aquesta peça com a base dels prototips permetrà poder variar les condicions de les càrregues, jugant amb els pendents i la massa del vehicle, amb açò es podrà obtindre una optimització d'aquesta peça en concret, que serà extrapolable a qualsevol altra peça funcional.

Durant el desenvolupament del treball, s'ha pogut comprovar que patrons massa complexos o percentatges de farcit massa elevats impossibiliten la validesa d'aquesta metodologia, ja que els simuladors no són capaços d'operar amb la quantitat de nodes i graus de llibertat que es generen. No obstant, s'ha pogut demostrar que per a patrons i farcits més senzills és un mètode vàlid, ja que permetrà a l'usuari l'optimització del seu disseny previ a la impressió.

Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	3
SUMMARY	5
RESUM	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS.....	15
LISTADO DE TABLAS.....	21
I. INTRODUCCIÓN	23
I.1. ANTECEDENTES.....	25
I.1.1. ¿Qué es la impresión 3D?	25
I.2. HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D	27
I.2.1. Antecedentes a la impresión 3D.....	27
I.2.2. Historia de la impresión 3D	28
I.3. LA IMPRESIÓN 3D.....	31
I.3.1. El proceso de la impresión 3D.....	31
I.3.2. Tecnologías de la impresión 3D	33
I.3.2.1. La Estereolitografía (SLA).....	34
I.3.2.2. Polyjet	35
I.3.2.3. Sinterizado selectivo por láser (SLS).....	36
I.3.2.4. Modelado por deposición fundida (FDM)	36
I.3.3. Materiales empleados en FDM.....	38
1.3.3.1 ABS.....	38
1.3.3.2 PLA.....	39
1.3.3.3 PC	40

1.3.3.4 PET	41
1.3.3.5 Otros materiales.....	42
I.3.4. Aplicaciones de la impresión 3D FDM.....	43
1.3.4.1 Alimentación	43
1.3.4.2 Medicina.....	44
1.3.4.3 Defensa.....	44
1.3.4.4 Aeroespacial.....	45
1.3.4.5 Arquitectura	46
1.3.4.6 Ingeniería.....	47

II. OBJETIVOS.....49

II.1. OBJETIVO GENERAL.....	51
-----------------------------	----

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	51
-----------------------------------	----

III. DESARROLLO PROYECTO55

III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS	57
--	----

III.1.1. Cuña sólida	59
----------------------------	----

III.1.2. Cuña hueca.....	60
--------------------------	----

III.1.3. Cuñas con patrón de relleno determinado	62
--	----

III.1.3.1 Cuña rellena con patrón de rejilla al 10%	67
---	----

III.1.3.2 Cuña rellena con patrón trihexagonal al 10%	72
---	----

III.2. NORMATIVA APLICABLE.....	77
---------------------------------	----

III.3. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES	79
---	----

III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES.....	83
-------------------------------------	----

III.5. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO.....	86
--	----

III.6. SIMULACIÓN MEDIANTE FEM	88
--------------------------------------	----

III.6.1. Modelo FEM proyecto.....	88
III.6.1.1. Aplicación de las sujeciones.....	89
III.6.1.2. Aplicación de materiales.....	90
III.6.1.3. Aplicación de estados tensionales.....	91
III.6.1.4. Mallado del prototipo.....	93
III.6.2. Análisis de estados tensionales.....	96
III.6.2.1 Primer estudio.....	97
III.6.2.1 Segundo estudio. Simulaciones con PET.....	103
III.6. PRESUPUESTO.....	107
III.7. CONCLUSIONES.....	110

IV. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA.....113

Referencias.....115

V. APÉNDICES.....117

IV.1. PLANOS DE FABRICACIÓN.....	119
IV.2. INFORME DE SIMULACIÓN.....	121

ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
CAD	Diseño asistido por computadora
FDM	Modelado por deposición fundida
FEM	Método de los elementos finitos
MIT	Instituto tecnológico de Massachusetts
PET	Tereftalato de polietileno
PLA	Ácido poliláctico
SLA	Estereolitografía
SLS	Sinterizado selectivo por láser
UV	Ultravioleta
...	
α	Ángulo de la pendiente
F_x	Fuerza en dirección x
F_y	Fuerza en dirección y
F_T	Fuerza total resultante
β	Ángulo del arco
....	

LISTADO DE FIGURAS

Figura I.1 Esquema simplificado del Modelado por deposición fundida (FDM).	26
Figura I.2 Fotografía de Gary Starkweather junto a su invento, la primera impresora por inyección de tinta.	27
Figura I.3 Esquema de Proceso de Estereolitografía (SLA) (17).	34
Figura I.4 Esquema de Maquina Polyjet (17).	35
Figura I.5. Proceso de Sinterizado selectivo por láser (SLS (17)).	36
Figura I.6 Proceso de Sinterizado selectivo por láser (SLS) (17).	37
Figura I.7 Se puede encontrar ABS en las famosas piezas de LEGO	39
Figura I.8 Bobinas de filamento de PLA en diferentes colores.	39
Figura I.9 Ejemplo de pieza impresa en PC o Policarbonato.	40
Figura I.10 Ejemplo de botella de PET, en este caso no ha sido fabricada mediante impresión 3D pero se puede ver su uso más extendido, esto es como recipiente para alimentos y bebidas.	41
Figura I.11 Ejemplo de impresión de modelado por deposición fundida de alimentos.	43
Figura I.12 Ejemplo de una prótesis ortopédica impresa mediante FDM.	44
Figura I.13 Fotografía de “The Liberator”, la primera arma de fuego funcional fabricada con una impresora 3D casera.	45
Figura I.14 Chasis de dron impreso mediante FDM con filamento de ABS fosforito.	45
Figura I.15 Casa construida mediante impresión 3D.	46
Figura III.1 Cuña para inmovilización de vehículos en la que se basarán los prototipos (2).	57
Figura III.2 Ejemplo de cómo se debe interpretar el código de un neumático.	58
Figura III.3 a) Definición de las dimensiones del rectángulo base para construcción de prisma rectangular, b) vista del prisma rectangular después de la aplicación de una función de extrusión de 95 mm en la dirección perpendicular a la base.	59

Figura III.4 a) Trazado de un arco de 3 puntos con radio dado, b) vista de la pieza definitiva tras una operación de corte con una profundidad de 95 mm perpendicular a la cara lateral.....	60
Figura III.5 a) Función de vaciado de una pieza, perpendicular a la base y respetando 2 mm de material en todas las caras, b) vista de la pieza tras la operación de vaciado. ...	60
Figura III.6 a) Definición de un plano coincidente con la base, b) operación de extrusión con una profundidad de 2mm utilizando las aristas croquizadas sobre el plano.	61
Figura III.7 Vista de sección del prototipo de cuña hueca.	61
Figura III.8 Muestra de algunos de los patrones o infill con los que realizar el relleno de piezas para impresión en 3D (1).	62
Figura III.9 Muestra de algunas opciones de porcentaje de relleno para unas piezas con patrón de relleno tipo rejilla (1).....	63
Figura III.10 Introducción del archivo STL en el software PusaSlicer.	64
Figura III.11 Pieza obtenida tras la introducción de los parámetros.....	65
Figura III.12 Exportar el archivo al software de CAD mediante un archivo tipo OBJ....	65
Figura III.13 a) Molde de patrón de rejilla al 10% de relleno, b) Molde de patrón trihexagonal al 10% de relleno.	66
Figura III.14 Definición de las dimensiones de la base.	67
Figura III.15 Definición de las dimensiones de las paralelas a 135°.	68
Figura III.16 Una vez que se dispone de la cuadrícula se debe recortar las líneas con la herramienta recortar entidades con el fin de obtener una rejilla con todas las paredes conectadas.....	69
Figura III.17 Estructura interna del prototipo completamente definida.....	69
Figura III.18 Resultado tras la extrusión de 93mm del croquis de la figura III.14.	70
Figura III.19 Plano definido sobre la base, se dibuja sobre él el perímetro del rectángulo exterior y se realiza una extrusión de 2mm.	70
Figura III.20 Vista de sección del prototipo finalizado, donde se puede apreciar la estructura interna definida.....	71

Figura III.21 Captura de pantalla del software UltimakerCURA con el que se realiza el laminado de los prototipos de este trabajo.	72
Figura III.22 Unidad de patrón compuesta por un hexágono y 6 triángulos equiláteros.	73
Figura III.23 Resultado obtenido tras ejecutar la matriz y previo paso a recortar las entidades que quedan fuera de los límites del prototipo.....	74
Figura III.24. Resultado que se obtiene tras realizar el corte a partir del arco.....	74
Figura III.25 Vista de sección del prototipo finalizado, donde se puede apreciar la estructura interna definida.....	75
Figura III.26 Captura de pantalla del software UltiakerCURA con el que se realiza el laminado de los prototipos de este trabajo.	76
Figura III.27 Diseño gráfico de las fuerzas que actúan sobre el vehículo en la pendiente. Se aprecia como actúa el peso, la descomposición de este, la fuerza normal y la de rozamiento que contrarresta F_x	80
Figura III.28 Diseño gráfico de las fuerzas que actúan sobre el calzo. Se puede observar cómo actúa F_x , F_B y la fuerza resultante, que es F_T	81
Figura III.29 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del PET.....	83
Figura III.30 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del ABS.	84
Figura III.31 Captura de pantalla de la web MatWeb donde se puede encontrar información acerca de propiedades de diversos materiales. En este caso muestra las propiedades correspondientes al Stratasys PLA 3D Printing Polymer (6).	85
Figura III.32 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del PLA (7) (8) . .	85
Figura III.33 Forma de proceder para introducir las condiciones de sujeción. En este caso, se indica que se trata de una geometría fija.	89
Figura III.34 Forma de proceder para introducir las condiciones de sujeción. Selección de la cara que va a ser anclada.....	90
Figura III.35 Forma de proceder para asignar un material al prototipo. Despliegue del menú Aplicar/Editar material.	90
Figura III.36 Ventana desplegable con la biblioteca que incorpora SolidWorks de materiales. Seleccionar el deseado y aplicar.	91

Figura III.37 Localización de la herramienta para introducir estados tensionales.....	92
Figura III.38 Selección de la cara donde se desea que se ejerza la fuerza e introducción del valor de esta.	92
Figura III.39 Forma de proceder para asignar una malla al prototipo. Ubicación de la opción “crear malla” cuando se despliega el menú.	93
Figura III.40 Seleccionar la casilla donde acceder a los parámetros de mallado e introducir el tamaño requerido.....	94
Figura III.41 Resultado tras el mallado del prototipo con patrón trihexagonal al 10%. .	95
Figura III.42 Datos obtenidos tras el mallado, dónde se puede apreciar el número nodos y de elementos, y los grados de libertad en el prototipo trihexagonal al 10%.	95
Figura III.43 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con ABS en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10°, b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10°, c) cuña sólida en una pendiente a 10°, d) cuña hueca en una pendiente a 20°, e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20°, f) cuña sólida en una pendiente a 20°, g) cuña hueca en una pendiente a 30°, h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30°, i) cuña sólida en una pendiente a 30°.	100
Figura III.44 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con PET en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10°, b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10°, c) cuña sólida en una pendiente a 10°, d) cuña hueca en una pendiente a 20°, e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20°, f) cuña sólida en una pendiente a 20°, g) cuña hueca en una pendiente a 30°, h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30°, i) cuña sólida en una pendiente a 30°.	101
Figura III.45 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con PLA en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10°, b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10°, c) cuña sólida en una pendiente a 10°, d) cuña hueca en una pendiente a 20°, e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20°, f) cuña sólida en una pendiente a 20°, g) cuña hueca en una pendiente a 30°, h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30°, i) cuña sólida en una pendiente a 30°.	102
Figura III.46 Gráfico en 3D. Los prototipos que se encuentren dentro de la zona roja tendrán tensiones por encima de las máximas.	106
Figura III.47 Gráfico circular con los componentes del precio de fabricación.....	109
Figura III.48 Imagen del prototipo impreso empleado para el desarrollo del trabajo..	112

Figura IV.1 Plano de fabricación del prototipo sólido.	119
Figura IV.2 Plano de fabricación del prototipo hueco.....	119
Figura IV.3 Plano de fabricación del prototipo con patrón de rejilla.	120
Figura IV.4 Plano de fabricación del prototipo con patrón trihexagonal.	120

LISTADO DE TABLAS

Tabla I.1 Resumen de tecnologías y materiales empleados en la impresión 3D.....	33
Tabla I.2 Diferentes filamentos de polímero imprimibles en impresoras 3D FDM, sus características principales y un ejemplo de producto finalizado (9).....	42
Tabla III.1 Definición de condiciones de estudio.....	97
Tabla III.2 Datos para las simulaciones con ABS y resultados.	98
Tabla III.3 Datos para las simulaciones con PET y resultados.....	98
Tabla III.4 Datos para las simulaciones con PLA y resultados.....	98
Tabla III.5 Datos empleados para la obtención del valor máximo para las gráficas de las simulaciones realiza.	99
Tabla III.6 Valores empleados para el cálculo de las fuerzas en las diferentes simulaciones.	104
Tabla III.7 Valores calculados para F_x en cada una de las 25 situaciones.....	104
Tabla III.8 Valores calculados para F_T en cada una de las 25 situaciones.....	104
Tabla III.9 Valores extraídos de las simulaciones referentes a las tensiones máximas sufridas según el criterio de Von Mises.	105
Tabla III.10 Valores normalizados.....	105
Tabla III.11 Valores extraídos del software de slicer para la realización del presupuesto.....	107
Tabla III.12 Valores calculados de Coste Total de material y tiempo de impresión.....	108
Tabla III.13 Diferentes costes directos e indirectos del proceso de fabricación.....	108
Tabla III.14 Calculo del coste total de las piezas.....	109
Tabla IV.1 Resultados del estudio de tensión.	121
Tabla IV.2 Resultados del estudio de desplazamientos.....	122
Tabla IV.3 Resultados del estudio de deformaciones.	123

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I.1. ANTECEDENTES

Para introducir este trabajo se profundizará en la historia de la impresión 3D, una tecnología cada vez más asentada en la sociedad, y que, pese a que puede considerarse como relativamente reciente, ha logrado introducirse en los hogares de muchos usuarios a un ritmo vertiginoso. Esto viene propiciado por el fuerte desarrollo que ha sufrido esta tecnología en las dos últimas décadas; la fácil accesibilidad a la instrumentación necesaria; el abaratamiento de coste de maquinaria y material; y la continua evolución de los programas de CAD (de sus siglas en inglés “Diseño Asistido por Computadora”) y los SLICER, de los que más adelante se hablará. Gracias a la cada vez más sencilla manejabilidad y comprensión de interfaz de estos softwares, junto a la gran cantidad de tutoriales que se pueden encontrar en foros, webs o incluso en academias físicas o virtuales, han permitido que cada vez más usuarios de diversa índole, formación (relacionada con las carreras técnicas o no) o procedencia puedan acceder a esta tecnología.

I.1.1. ¿Qué es la impresión 3D?

La impresión 3D engloba un grupo de técnicas de fabricación que permite realizar piezas o figuras en 3 dimensiones mediante la adición de material en capas, partiendo de un diseño digital. Según las características de las máquinas de fabricación aditiva, más conocidas como impresoras 3D, se podrán emplear diferentes materiales, y en algunas de ellas, de manera simultánea.

Según las diferentes técnicas de funcionamiento se puede distinguir entre las impresoras 3D de compactación, donde el polvo de material se compacta por capas y las impresoras 3D aditivas en las que el material es fundido y depositado en capas.

Las principales impresoras de compactación son:

-Impresoras 3D de tinta: en esta técnica se compacta el polvo mediante el uso de una tinta aglomerante que además nos permite la impresión en diferentes colores.

I. Introducción

-Impresoras 3D de láser (SLS): está basado en la tecnología de Sinterizado Selectivo por Láser. En este caso es un láser el que transfiere energía al polvo haciendo que polimerice y mediante inmersión estas partes polimerizadas solidifican.

En cuanto a las técnicas de adición de material por capas se puede encontrar también múltiples opciones, donde destacan:

-Estereolitografía (SLA): técnica que utiliza el principio de fotopolimerización empleando, como en el caso del tipo SLS, un rayo láser de luz ultravioleta. La principal diferencia es que en lugar de aplicarlo sobre polvos de material se aplica sobre resinas líquidas sensibles a la luz UV.

-Modelado por Deposición Fundida (FDM): se trata de la técnica más tardía en aparecer, pero la más expandida hoy en día. En ella un filamento de un material se funde y es extruido a través de una boquilla depositándolo en capas sobre un lecho.

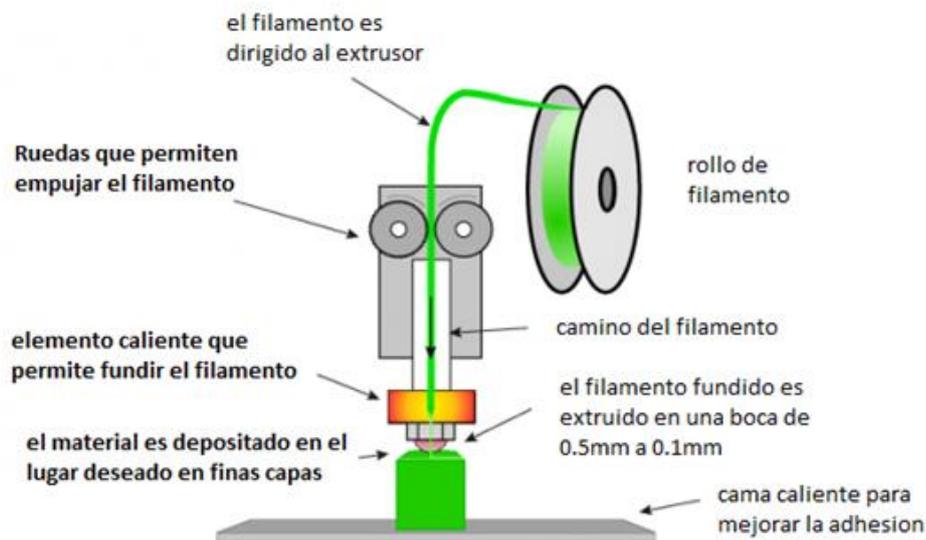


Figura I.1 Esquema simplificado del Modelado por deposición fundida (FDM).

I.2. HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D

I.2.1. Antecedentes a la impresión 3D

Para comprender el desarrollo histórico de la impresión 3D se deben remarcar dos tecnologías que combinadas han llevado a disponer hoy en día de esta tecnología: la impresión por inyección de tinta y los inicios del escaneado de objetos en 3 dimensiones.

La impresión por inyección de tinta nace de la mano de Charles Babbage, quien en 1940 creó los diseños de la primera impresora, aunque no se pudo construir hasta 50 años después por falta de tecnología y recursos en ese momento (11).

Fue pues en 1976 cuando llegó la primera impresora de tinta en 2D al mercado, basada en unos planos que el ingeniero norteamericano llamado Gary Starkweather creó en 1969 y que 2 años después se hicieron realidad en el centro de investigaciones Xerox (11).



Figura I.2 Fotografía de Gary Starkweather junto a su invento, la primera impresora por inyección de tinta.

I. Introducción

En cuanto a los inicios del escaneado de objetos en 3 dimensiones se debe retroceder hasta el siglo XIX, siglo en el que desarrollaron su trabajo dos personas pioneras en este campo: **François Willème**, un escultor francés que en 1859 creó un artilugio con 24 cámaras fotográficas con las que intentó “escanear” un objeto en 3D mediante la toma de una instantánea desde diferentes perspectivas; y **Joseph E. Blather** quien en 1892 consigue crear mapas en tres dimensiones mediante una técnica de estratificación similar a la que se basarán las impresoras 3D casi un siglo después (14).

I.2.2. Historia de la impresión 3D

Son muchos los acontecimientos que se han dado desde 1976 donde apareció esa primera impresora en 2D de inyección de tinta hasta la actual presencia de las impresoras 3D en el mundo industrial. Para conocer un poco más de esta historia, se va a destacar los principales acontecimientos que han llevado hasta la situación actual:

Año 1976: Llega al mercado la primera impresora de inyección de tinta, creación del ingeniero estadounidense, Gary Starkweather.

Año 1981: El japonés Hideo Kodama, del Instituto de Investigación de Nagoya, inventó dos métodos de fabricación en plástico con un polímero que se endurecía con la luz ultravioleta (13; 14).

Año 1984: **Alain Le Méhauté, Oliver de Witte y Jean Claude André** presentan su patente del primer modelo SLA (Estereolitografía). La compañía General Electric francesa (que ahora es Alcatel-Alsthom) desechó el proyecto poco después. Por su parte, **Chuck Hill**, avanza en su propio invento basado en el modelo SLS (13).

Año 1986: **Chuck Hill** patenta su invento y crea la empresa 3D SYSTEMS. Esta empresa también será la primera en ofrecer una impresora 3D SLA comercial, la SLA-1 (14).

I. Introducción

Año 1987: En este caso es **Carl Deckard**, investigador de la Universidad de Texas, quién desarrolla la tecnología SLS. El primer modelo apareció pronto, llamado Betsy; pero no fue hasta 2006 cuando apareció el primer modelo comercial (14).

Año 1988: **S. Scott Crump** y **Lisa Crump** inventan la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundida). Además, este año será importante por la llegada al mercado de la primera impresora de 3D Systems basada en tecnología STL (14).

Año 1989: **S. Scott Crump** y **Lisa Crump** fundan Stratasys, que hoy en día sigue siendo una empresa pionera en el mundo de la impresión 3D (14).

Año 1992: Stratasys patenta su tecnología de FDM.

Año 1993: El MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) desarrolla la impresión 3D por inyección (3DP).

Años 1995: Aparece Z-Corporation, hoy en día integrada en 3D Systems.

Año 1996: Nace ARCAM.

Año 1997: Se crea Objet Geometries, que luego será adquirida por Stratasys.

Año 1999: La impresión 3D llega a la medicina, implantándose los primeros órganos modificados con impresión 3D (13). El primer caso fue una vejiga urinaria utilizando recubrimiento sintético con sus propias células (16).

Año 2000: MCP Technologies introduce la tecnología basada en la Fusión Selectiva por Láser (SLM).

Año 2005: El Dr. Adrian Bowyer, profesor de la Universidad de Bath de USA, funda el proyecto **RepRap**. Se trata de un proyecto que busca crear una impresora 3D de código abierto y autorreplicable (14).

Año 2006: El proyecto Fab@Home, de la Universidad Cornell, ofrece la primera impresora 3D de código abierto, adelantándose así al proyecto de RepRap. Se construye la primera máquina SLS (sinterización de láser selectivo) (13).

I. Introducción

Año 2007: Llega al mercado el primer sistema de 3DSystems por menos de 10.000 dólares.

Año 2008: Primera prótesis impresa en 3D. RepRap lanza “Darwin”, la primera impresora auto-replicante (13).

Año 2009: Sale al mercado la primera impresora 3D en forma de Kit, de la mano de Industrias MakerBot (14).

Año 2011: Se empieza a investigar con la impresión 3D de alimentos.

Año 2012: 3D Systems adquiere Z Corporation y Vidar Systems. Por otro lado, Stratays se fusiona con Object Geometries.

Año 2013 - Actualidad: Llegado a este punto ya estaba sembrada la semilla de la impresión 3D, y son decenas los avances significativos que sufre esta tecnología cada año, en alimentación, medicina, defensa o arquitectura, por ejemplo. En próximos apartados se profundizará en el desarrollo que ha sufrido esta tecnología en los campos citados.

I.3. LA IMPRESIÓN 3D

I.3.1. El proceso de la impresión 3D

El proceso de la impresión 3D es un proceso largo y a veces complejo en el que muchas partes y tecnologías se combinan para llegar al resultado final, que es la obtención de una pieza en tres dimensiones. Muchos de estos pasos son comunes independientemente del tipo de impresión 3D que se vaya a realizar, y los podemos resumir en los siguientes 6 pasos:

PASO 1 DISEÑO: Se creará un modelo digital utilizando generalmente cualquier software de CAD. En este trabajo se utilizará SolidWorks en su versión de 2019.

PASO 2 EXPORTACIÓN: Este diseño será almacenado como un modelo STL generalmente. STL es un formato de archivo informático de CAD que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas.

Estos dos pasos previos pueden ser simplificados dado que actualmente se puede encontrar una gran cantidad de webs en las que se puede descargar diseños de modelos digitales, en algunos casos de forma gratuita y en otros mediante pago por los derechos del autor. Algunos ejemplos de estas páginas son Thingiverse, Cults, MyMinifactori, Prusaprinters. En ellas los usuarios pueden elegir si monetizar o no sus diseños, a excepción de Thingiverse, que es 100% gratuita y la más extendida entre la comunidad.

PASO 3 SLICER O REBANADOR: El archivo STL es introducido en un software de corte, en inglés SLICER. El Slicer calcula las intersecciones del objeto 3D de los planos a la altura de capa de impresión, y determina las secciones que obtiene. Lo divide en "rebanadas", de ahí su nombre. Para cada una de estas secciones, calcula los movimientos que debe hacer el cabezal para rellenar cada área. En resumen, el SLICER convierte el modelo en una lista de comandos que la impresora 3D pueda entender y ejecutar, generalmente llamados código g o g-code.

PASO 4 TRASFERENCIA DE INFORMACIÓN: Se debe introducir en la impresora 3D este g-code que hemos obtenido, para ellos se utiliza una conexión USB

I. Introducción

(Universal Serial Bus) entre el PC y la impresora o se pueden utilizar dispositivos de almacenamiento de información externos.

PASO 5 IMPRESIÓN: Una vez calibrada la impresora, preparado el material e introducido nuestro g-code, la ponemos en funcionamiento y solo queda esperar el resultado.

PASO 6 ACABADO: Se retira de la plataforma el objeto con cuidado de que no se rompa en al despegarlo de la cama caliente. Se pueden realizar tareas de postprocesamiento, como son eliminar las partes adicionales que han servido de soporte si han sido necesarias, lijar las piezas y pintarlas.

I. Introducción

I.3.2. Tecnologías de la impresión 3D

En la actualidad se encuentran una gran cantidad de técnicas para realizar una impresión 3D. Prácticamente todas se basan en el mismo concepto, la construcción de piezas en tres dimensiones mediante la superposición de capas de material, y principalmente se diferencian por la forma en la que se usan las diferentes capas para crear las piezas. Algunas de ellas basan su funcionamiento en la deposición de materiales líquidos que son solidificados posteriormente empleando diferentes tecnologías; y otras basan su funcionamiento en el fundido o ablandamiento del material para producir las capas. En la Tabla I.1. se puede observar las principales tecnologías y los materiales que pueden emplear.

Tabla I.1 Resumen de tecnologías y materiales empleados en la impresión 3D.

TIPO	TECNOLOGÍAS	MATERIALES
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS), metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metal
Granulado	Sinterizado de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles

Cada método cuenta con sus pros y contras, las principales diferencias las se pueden encontrar en la velocidad de trabajo, el coste de maquinaria, el coste de material, el tipo de material empleado, cantidad de materiales imprimibles simultáneamente y capacidad de producción. Según las necesidades finales se podrá elegir un modelo u otro según las prioridades que se tengan. A continuación, se profundizará en los cuatro modelos de fabricación aditiva que actualmente son más comunes:

I. Introducción

I.3.2.1. La Estereolitografía (SLA)

Como se ha visto se trata de la primera tecnología de impresión 3D, desarrollada por 3D Systems. Cuenta con una bandeja donde se encuentra depositado un fotopolímero líquido. El método empleado es capa por capa, donde un láser de luz ultravioleta golpea el líquido que se solidifica bajo la influencia de esta luz. La bandeja que contiene el líquido baja cada vez que una capa es finalizada para pasar a la siguiente capa. Una vez finalizada la impresión se debe enjuagar el objeto con disolvente e introducirlo en un horno, lo que ralentiza el proceso. Los materiales que se pueden emplear con esta técnica son fotopolímeros y resinas fotosensibles, lo que acota bastante su uso. Con esta técnica se obtendrán objetos con una alta precisión, pero también relativamente frágiles. Todo esto hace que sea empleada principalmente para la creación de prototipos.

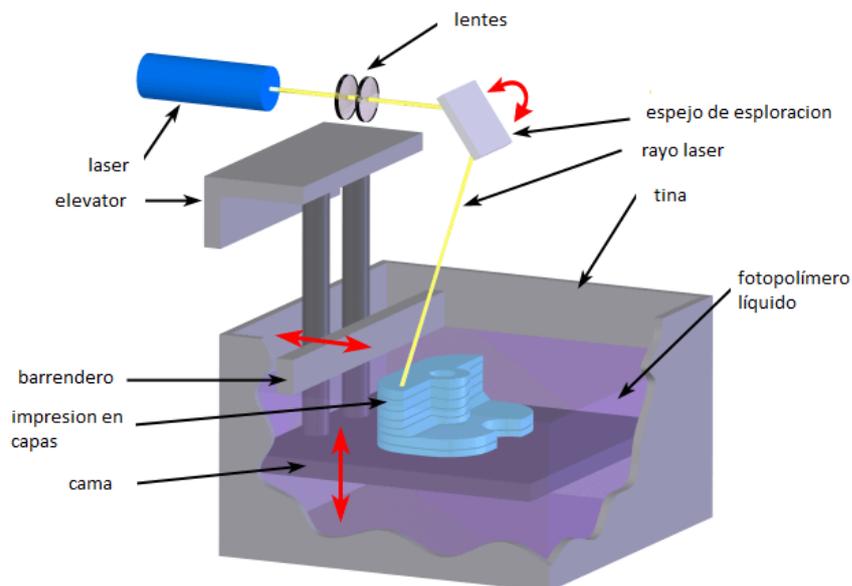


Figura I.3 Esquema de Proceso de Estereolitografía (SLA) (17).

I. Introducción

I.3.2.2. Polyjet

Aparece en 1999 de la mano de la empresa Objet. Al igual que la SLA basa su funcionamiento en la fotopolimerización, pero en este caso son chorros de material los que son proyectados sobre el soporte de impresión, seguidamente este material es solidificado por la incidencia de un rayo de luz ultravioleta. Su principal ventaja es su acabado superficial, de una altísima calidad y con ella se puede obtener moldes precisos, formas complejas y se puede aportar al modelo una gran variedad de materiales y colores. Su principal inconveniente es su precio.

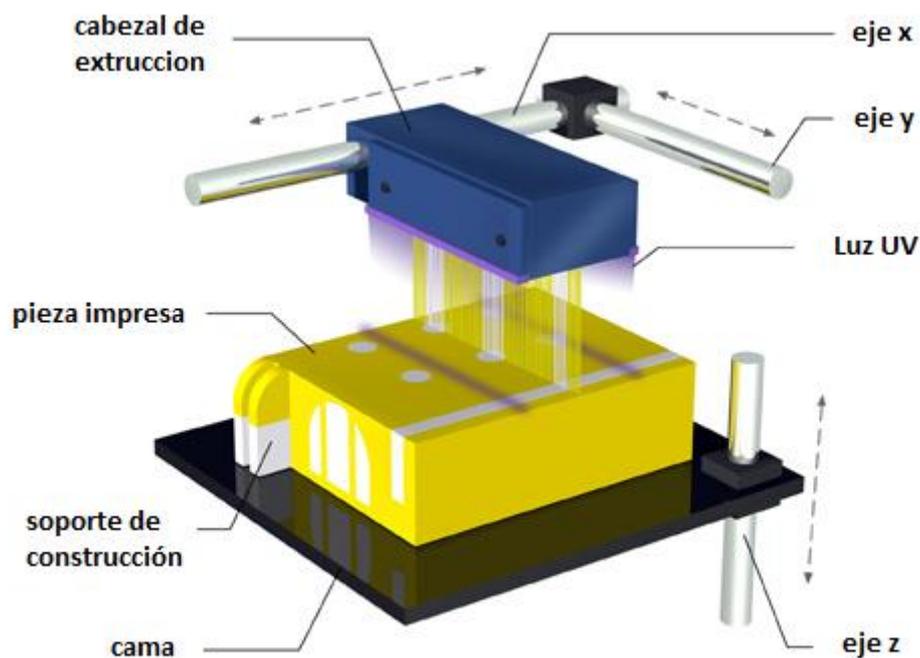


Figura I.4 Esquema de Máquina Polyjet (17).

I. Introducción

I.3.2.3. Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Esta tecnología basa su funcionamiento en la deposición de una ligera capa de material en polvo en un recipiente a temperaturas inferiores a la de fusión del material, tras esto, mediante la incidencia de un láser sobre estos polvos en las zonas deseadas, las partículas se fusionan y solidifican. Tras concluir una capa, se vuelve a depositar polvo y a repetir el proceso. El material no solidificado sirve de soporte a la pieza y puede ser empleado en futuras impresiones. Los materiales que se pueden emplear con esta técnica son termoplásticos, polvos metálicos y polvos cerámicos.

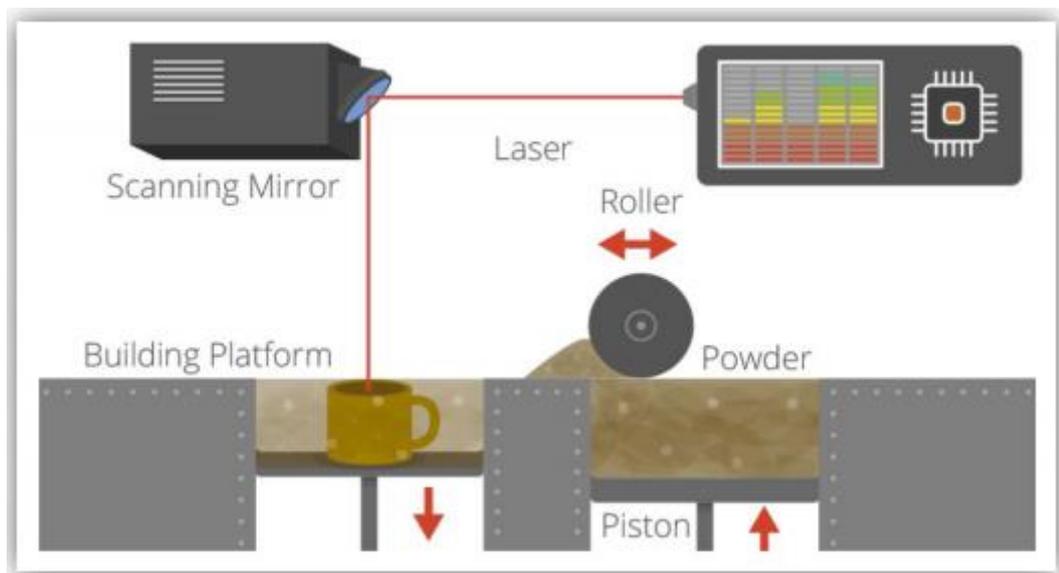


Figura I.5. Proceso de Sinterizado selectivo por láser (SLS (17)).

I.3.2.4. Modelado por deposición fundida (FDM)

Como se ha visto en la historia de la impresión 3D, es en el año 1988 cuando **S. Scott Crump** y **Lisa Crump** inventan la tecnología FDM, fundadores de Stratasys. FDM cuenta con patente como tal, por lo que se puede encontrar este modelado en otras maquinarias bajo otro nombre como FFF (Fabricación por Filamento Fundido), término que emplea la comunidad de RepRap, que como se ha mencionado, destaca por crear una impresora 3D de código abierto y autorreplicable.

I. Introducción

Centrándonos en la tecnología, el proceso es sencillo y muy eficiente. Un material, normalmente presentado en forma de bobina, es extruido a través de una boquilla a una temperatura adecuada al material en torno a su punto de fusión. Mediante un cabezal móvil es depositado sobre el soporte en capas. Algunos materiales requieren que el soporte, llamado cama caliente, esté a una temperatura para corregir los fallos producidos por la contracción del material (por ejemplo, en el ABS). Se pueden encontrar en el mercado muchas versiones de esta máquina, que ya se encuentran desde los 100 euros, o incluso menos. Algunas de ellas incluso cuentan con dos boquillas de extrusión lo que nos permite imprimir en dos colores o dos materiales. Los materiales empleados son termoplásticos (PLA, ABS, ...), materiales comestibles y algunos tipos de metales mezclados con polímeros. Su sencillez y facilidad de uso hace que sea el modelo de impresión 3D más extendido en el mundo no profesional.

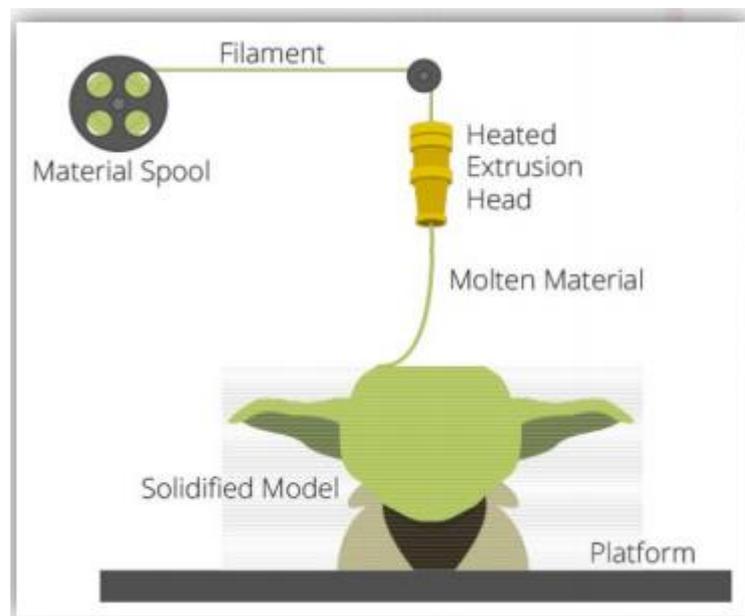


Figura I.6 Proceso de Sinterizado selectivo por láser (SLS) (17).

I. Introducción

Dado que este proyecto está basado en la tecnología FDM, en los siguientes puntos se concentrará la información en lo relacionado a esta tecnología, ya que como se ha visto, el mundo de la impresión 3D es demasiado extenso para abarcarlo por completo en un solo trabajo (15).

1.3.3. Materiales empleados en FDM

Las impresoras 3D con tecnología FDM tienen versatilidad en cuanto a materiales considerada como amplia, pudiéndose imprimir con prácticamente todos los termoplásticos, con filamentos de material comestible y hasta con metales mezclados con polímeros. Además, cada día aparecen en el mercado nuevas aleaciones imprimibles. En este apartado, se va a intentar conocer un poco más acerca de los materiales que más se utilizan, y más adelante se pondrá especial atención en tres de ellos, ABS, PLA Y PET, ya que son los que se utilizarán para los prototipos y las simulaciones de este trabajo.

1.3.3.1 ABS

El ABS o Acrilonitrilo Butadieno Estireno pese a que es el polímero más complicado de fabricar y de imprimir, también es el que más se emplea en las impresoras 3D actualmente. Esto sucede por la versatilidad de sus propiedades, ya que son plásticos rígidos, duros y tenaces, tienen una gran tenacidad (capacidad de deformarse sin romperse) y resistencia a impactos, bajas temperaturas y vibraciones. Es un polímero reutilizable, aunque no es biodegradable; y puede ser soldado mediante procesos químicos. La principal dificultad que encontramos a la hora de imprimir con él es su alta contracción a temperatura ambiente lo que provoca que se despeguen las piezas del soporte, aunque las impresoras actuales ya vienen preparadas para esto con una cama caliente en la que se puede regular la temperatura para evitar esta contracción (9) (10).

I. Introducción



Figura I.7 Se puede encontrar ABS en las famosas piezas de LEGO

1.3.3.2 PLA

El PLA o Ácido poliláctico es todo lo contrario al ABS. Es un polímero fácil de imprimir, cómodo, es biodegradable, fabricado con materias primas renovables como el almidón de maíz, no requiere de camas calientes por su baja contracción, se enfría y solidifica muy rápidamente y sus propiedades mecánicas son peores. Es un material muy usado al principio de la experiencia con las impresoras 3D por su facilidad de uso. Podemos encontrarlo en gran cantidad de colores en bobinas, colores pastel, vivos, fosforitos, incluso en imitación de maderas y metales (9) (10).



Figura I.8 Bobinas de filamento de PLA en diferentes colores.

I. Introducción

1.3.3.3 PC

El PC o Policarbonato también cuenta con unas buenas propiedades mecánicas: tiene una alta resistencia, es flexible, soporta bien las altas temperaturas, etc. Por ello es muy empleado no solo en impresión 3D, sino también en ingeniería, automoción o medicina, por ejemplo. Su principal inconveniente a la hora de la impresión es que requiere una alta temperatura para evitar la separación de capas, aunque actualmente los filamentos suelen incorporar aditivos que permiten su impresión a temperaturas más bajas. Otro problema que presenta es que tiende a adsorber la humedad del aire, por lo que se recomienda guardarlo en lugares herméticos y a efectuar su impresión dentro de una estructura cerrada (9) (10).



Figura I.9 Ejemplo de pieza impresa en PC o Policarbonato.

I. Introducción

1.3.3.4 PET

El PET o Tereftalato de Polietileno es el plástico más usado en los objetos que entran en contacto con alimentos y bebidas, es decir, en casi todos los recipientes de uso cotidiano en alimentación. Sus principales características son su transparencia y dureza; y además es reciclable y se considera respetuoso con el medio ambiente: es resistente al desgaste, a la rotura y al fuego; y no emite sustancias tóxicas que contaminen.

En impresión 3D es sencillo de emplear, se puede que trabajar a bajas temperaturas comparado con otros filamentos y se obtendrán piezas con una buena resistencia (9).



Figura I.10 Ejemplo de botella de PET, en este caso no ha sido fabricada mediante impresión 3D pero se puede ver su uso más extendido, esto es como recipiente para alimentos y bebidas.

I. Introducción

1.3.3.5 Otros materiales

Como se ha comentado son decenas los materiales que podemos emplear en impresión 3D, la lista es excesivamente extensa y las posibilidades son casi ilimitadas con las aleaciones y combinaciones. A continuación, resumiremos nueve más de ellos, aunque me reitero en que la lista es mucho más larga.

Tabla I.2 Diferentes filamentos de polímero imprimibles en impresoras 3D FDM, sus características principales y un ejemplo de producto finalizado (9).

Filamento	Características	Ejemplo
Nylon	Alta dureza, flexibilidad y durabilidad. Se puede teñir antes o después de la impresión.	
TPE, TPU, TPC	Elastómeros termoplásticos. Tienen propiedades elásticas, son muy flexibles y duraderos.	
Madera	Se mezclan diferentes maderas con PLA. Empeora las propiedades mecánicas, pero estéticamente es muy llamativo.	
Metal	Se consigue mezclando polvo de metal con PLA o ABS, normalmente al 50%, aunque podemos encontrar hasta con 85% de metal. Conseguimos modelos funcionales.	
BioFia	Filamentos biodegradables cuya principal característica es que son respetuosos con el medio ambiente. Malas propiedades mecánicas y caros.	
Arcilla / Cerámica	Son filamentos que presentan combinación de polímeros con arcillas, cuya principal característica es que se puede cocer al horno tras su impresión.	
Fibra de Carbono	Se trata de filamentos de PLA, ABS O PETG reforzados con fibra de carbono. Obtendremos piezas funcionales, fuertes y ligeras.	

1.3.4. Aplicaciones de la impresión 3D FDM

Como en el anterior apartado, en el que se ha podido apreciar la gran cantidad de materiales que se pueden emplear en máquinas de modelado por deposición fundida, los campos de aplicación de esta tecnología son incontables. De nuevo, se va a intentar realizar un pequeño acercamiento a los más destacables y extendidos.

1.3.4.1 Alimentación

Realmente, se podría decir que cualquier cosa que se presente en forma líquida o en polvo puede ser impresa en 3D. Esto sucede con muchos alimentos, como el azúcar, el queso, salsas, chocolate, o incluso con algunas pastas. Con la impresión 3D de alimentos se pueden obtener productos innovadores con nuevos perfiles de sabor, emplear fuentes de alimentos poco aceptadas socialmente como pueden ser los insectos como fuente de proteínas y profundizar en la cocina de diseño dando nuevas formas muy precisas.



Figura I.11 Ejemplo de impresión de modelado por deposición fundida de alimentos.

I. Introducción

1.3.4.2 Medicina

Con esta tecnología se puede personalizar las soluciones para cada paciente. Se puede imprimir de manera individualizada todo órgano de tejido blando, como son las orejas o un riñón. También implantes para el cráneo o la cadera. Además, uno de sus principales usos viene de la mano de las prótesis ortopédicas, donde los propios pacientes pueden diseñarse sus propias prótesis.



Figura I.12 Ejemplo de una prótesis ortopédica impresa mediante FDM.

1.3.4.3 Defensa

Muchas piezas de uso militar son complejas y se producen en cantidades muy pequeñas. Mediante la impresión 3D se pueden obtener recambios para estas piezas con una alta calidad, buenas propiedades mecánicas y a un precio inferior.

También supone un riesgo, pues con unos buenos planos se puede imprimir cualquier cosa, incluso armas. Esto sucedió cuando aparecieron unos planos de una pistola de plástico, "The Liberator", la primera arma de fuego funcional difícil de detectar.

I. Introducción



Figura I.13 Fotografía de “The Liberator”, la primera arma de fuego funcional fabricada con una impresora 3D casera.

1.3.4.4 Aeroespacial

Su principal aplicación se puede encontrar en otra tecnología emergente como son los drones. Son muchos los planos que facilitan el fabricar un dron en casa con una impresora 3D, al menos las partes estructurales.

Otro gran uso se da en la Estación Espacial Internacional, ya que permite a los ingenieros astronautas que realizan ahí sus estudios fabricar recambios o piezas necesarias sin tener que esperar a la siguiente misión espacial.



Figura I.14 Chasis de dron impreso mediante FDM con filamento de ABS fosforito.

I. Introducción

1.3.4.5 Arquitectura

Su principal uso en arquitectura se encuentra en el desarrollo de las maquetas que todo arquitecto necesita para sus diseños, lo que ahorra mucho tiempo en los proyectos.

Otro uso de la impresión 3D en arquitectura que se desarrolla cada vez más rápidamente es la construcción de casas con versiones gigantes de impresoras 3D. La primera prueba se realizó en 2014 en un canal de Ámsterdam, pero hoy en día ya se pueden “imprimir” casas completas en días, o incluso horas. Es uno de los grandes mercados de futuro de la impresión 3D. En construir la casa de la siguiente figura se tarda de 12h a 24h y su coste oscila entre los 4.000\$ y los 10.000\$.



Figura I.15 Casa construida mediante impresión 3D.

I. Introducción

1.3.4.6 Ingeniería

Para finalizar este repaso a los principales campos de aplicación de la impresión 3D de modelado por deposición fundida se mencionarán algunas de sus aplicaciones en ingeniería.

Hoy en día no está generalizado su uso para producir piezas en masa, pues hay técnicas mucho más rápidas, como la inyección de plástico. Por ello, podemos destacar dos usos principales:

Piezas específicas: Con esta tecnología se puede obtener piezas que no se emplean en grandes cantidades y que requieren de una alta precisión. También se pueden obtener pequeñas piezas con grandes detalles.

Prototipado: Se emplea la impresión 3D para obtener prototipos de piezas que se quieren someter a estudios para ver su comportamiento mecánico o su acabado final. Es una forma rápida y sencilla de obtener piezas sin recurrir a costosos moldes y de poder realizar pequeñas modificaciones hasta lograr el producto final.

Este último uso, el prototipado de piezas para la ingeniería será el que se usará en este trabajo de fin de grado, en el que se diseñará una pieza para ser impresa en 3D y se estudiará su comportamiento según diferentes variaciones, como son el patrón de relleno, la densidad de material, el tipo de material o la fuerza a la que es sometida la pieza.

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto es el diseño, modelización mecánica y fabricación de piezas funcionales obtenidas mediante técnicas de fabricación aditiva. Para ello se va a realizar un prototipo de una pieza funcional enfocada a la impresión en 3D con una máquina de modelado por deposición fundida, sobre la que se van a realizar diferentes modificaciones de carácter estructural, pero también de composición y de cargas externas para observar cómo varía su comportamiento en cada una de las situaciones, utilizando principalmente la herramienta de simulación incluida en el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks en su versión de 2019 y poder obtener conclusiones que ayuden a mejorar la selección de parámetros para futuros prototipados.

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES

Diseño del prototipo.

Se pretende diseñar una pieza funcional que sirva como base para realizar las diferentes modificaciones y simulaciones con las que se pretende obtener una mejoría en la selección de parámetros para otros diseños de piezas en 3D funcionales.

Selección de materiales.

Como se ha visto son muchos los materiales entre los que elegir para imprimir en tres dimensiones. Con este trabajo se pretende profundizar un poco en algunos de ellos, observando sus características y propiedades mecánicas, con el fin de poder descartar o potenciar alguno de ellos para su uso en piezas funcionales.

II. Objetivos

Selección de patrones de relleno.

Como se verá más adelante son múltiples las opciones que tenemos para realizar el relleno de una pieza en 3D, que va desde la fabricación de piezas huecas a piezas completamente solidas. Indagaremos en las diferentes opciones de las que se dispone para el relleno intentando escoger los que mejor se adapten a los objetivos del trabajo.

Innovar en el estudio del comportamiento mecánico según el patrón escogido.

No son muchos los programas que te permiten simular una pieza impresa en una impresora en 3D basada en FDM y muchas veces es complicado el acceso a ellos. Por ello, se pretende desarrollar una metodología que permita realizar un análisis de las piezas sin disponer de estos programas, con herramientas más sencillas y al alcance de todos.

Estudio del estado tensional en unas condiciones específicas

Estudiar y calcular las diferentes fuerzas y cargas a las que va a estar sometida la pieza según las diferentes condiciones de estudio. Escoger un caso real que sirva de base para ello.

Estudio de deformaciones bajo una carga distribuida previamente calculada.

Realizar una serie de simulaciones utilizando el complemento de simulación que viene con el paquete de SolidWorks, utilizando todos los parámetros seleccionados anteriormente como son diseño de la pieza, material, patrón de relleno y cargas externas.

II. Objetivos

Análisis de resultados y conclusiones.

Realizar una recopilación de todos los datos obtenidos en las diferentes simulaciones, y mediante un estudio de estos, poder alcanzar conclusiones que sirvan para que, en futuras modelizaciones, se puedan tomar mejores decisiones que faciliten el éxito de los proyectos.

III. DESARROLLO PROYECTO

DESARROLLO PROYECTO

III. Desarrollo proyecto

III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS

Para la realización de este trabajo se va a diseñar una cuña de frenado de vehículos, fabricada mediante modelado por deposición fundida en diferentes materiales, patrones de relleno y porcentajes de relleno. Para lograr esto se deben crear varios prototipos en SolidWorks para poder realizar simulaciones sobre ellos. Concretamente se realizarán cuatro prototipos basados en un modelo variando su diseño interior. Estos prototipos, descritos brevemente, serán una pieza completamente sólida, una pieza hueca, una pieza con un patrón de rejilla al 10% de relleno y una pieza con un patrón de relleno trihexagonal al 10%.

Para diseñar estos prototipos se va a utilizar como modelo una cuña ya existente para vehículos, que será adaptada a la rueda que monta un Toyota Corolla, utilizando las especificaciones de este para el resto de los cálculos, como el radio de curvatura o su masa.

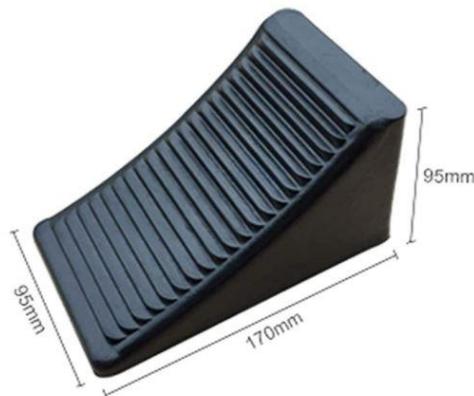


Figura III.1 Cuña para inmovilización de vehículos en la que se basarán los prototipos (2).

III. Desarrollo proyecto

Definido el largo, ancho y alto del calzo, se procederá a calcular el radio de arco sobre el que reposará el neumático. Para ello, como se ha mencionada anteriormente, se utilizará un neumático tipo 195 / 60 R15, que es el que monta un Toyota Corolla.

Se precisará pues, obtener el radio del neumático. Para ello se debe recordar a qué hace referencia la nomenclatura de los neumáticos.

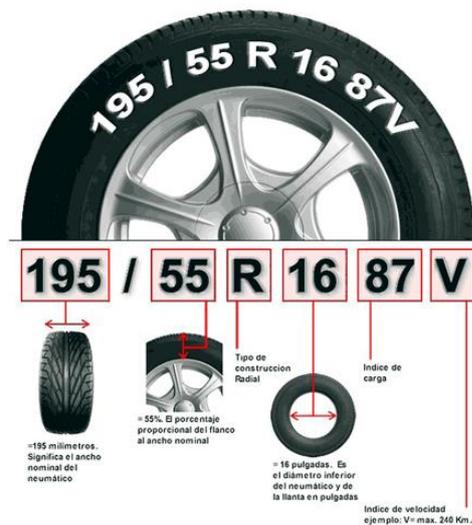


Figura III.2 Ejemplo de cómo se debe interpretar el código de un neumático.

Como se aprecia en la figura de ejemplo, la interpretación de los tres términos sería:

Primer término: Hace referencia a la anchura del neumático, en este caso, 195 mm.

Segundo término: Relaciona la anchura con la altura del neumático. Como en este caso es un 60%, quiere decir que la parte de goma relativa al radio es de $195 \times 0.6 = 117$ mm.

Tercer término: Indica el diámetro exterior de la llanta en pulgadas. Dado que 1 pulgada equivale a 25,4 mm, se puede deducir que la llanta tendrá 381 mm de diámetro, o lo que es lo mismo, 190,5 mm de radio.

Con esta información se puede calcular el radio de curvatura, pues simplemente habrá que sumar el radio de la llanta al flanco del neumático calculado:

$$117 + 190.5 = 307.5\text{mm} = \text{Radio del Arco}$$

III. Desarrollo proyecto

III.1.1. Cuña sólida

Para el diseño de la cuña sólida inicialmente se definen las dimensiones de la base, que serán $95 \times 170 \text{ mm}^2$; y se realiza una función de extrusión con una profundidad de 95 mm, con lo que se obtendrá un cubo de $95 \times 179 \times 95 \text{ mm}^3$.

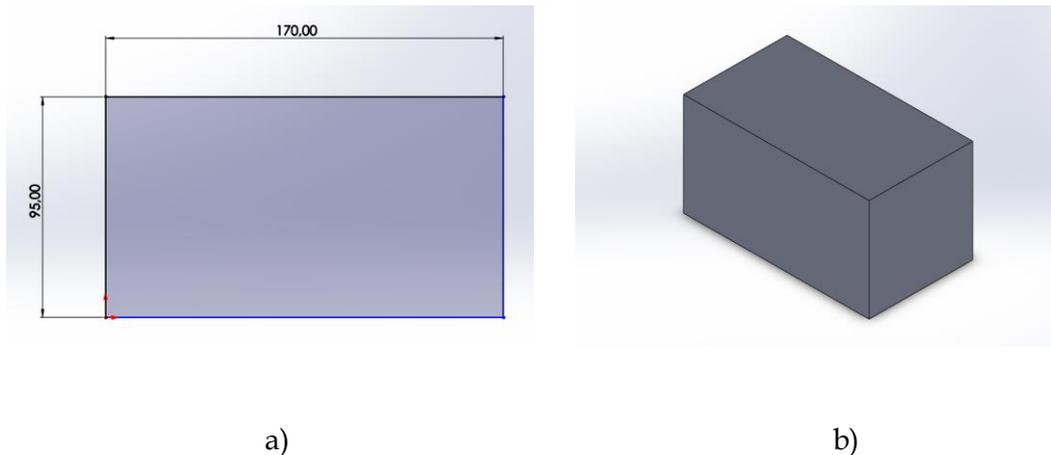


Figura III.3 a) Definición de las dimensiones del rectángulo base para construcción de prisma rectangular, b) vista del prisma rectangular después de la aplicación de una función de extrusión de 95 mm en la dirección perpendicular a la base.

A continuación, se definirá un plano coincidente con una de las caras laterales. En este plano se realizará un nuevo croquis donde primero se marcarán los puntos por donde debe pasar el arco de curvatura y después se dibujará el mismo utilizando la herramienta arco de 3 puntos, utilizando los dos puntos previamente definidos y otro cualquiera en el plano, modificando después del radio del arco introduciendo el que ha sido calculado previamente. Después de esto se realiza una operación de corte con una profundidad de 95 mm.

III. Desarrollo proyecto

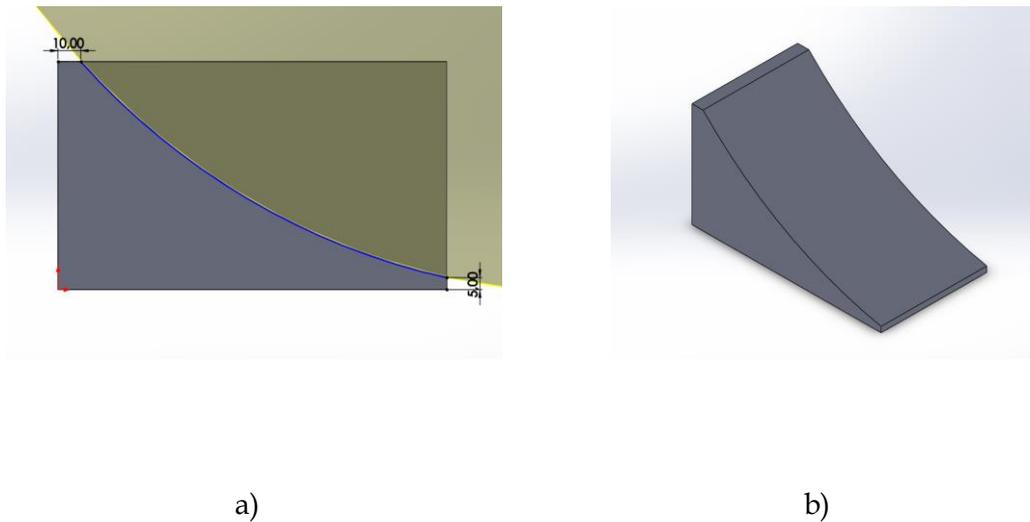


Figura III.4 a) Trazado de un arco de 3 puntos con radio dado, b) vista de la pieza definitiva tras una operación de corte con una profundidad de 95 mm perpendicular a la cara lateral.

III.1.2. Cuña hueca

Para el prototipo que será completamente hueco utilizaremos el prototipo macizo previamente diseñado. Inicialmente se realizará una operación de vaciado a partir de la base y en la que se indicará que se deben respetar 2 mm en todas las paredes de la pieza.

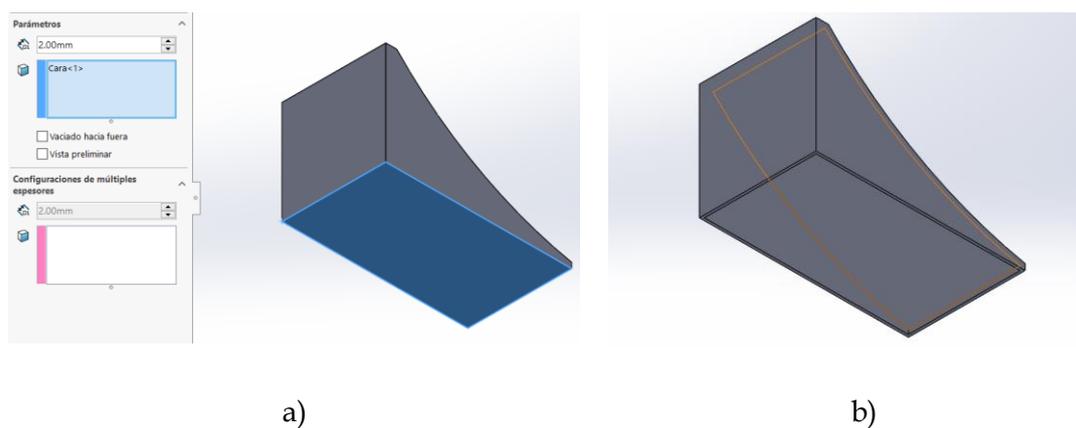


Figura III.5 a) Función de vaciado de una pieza, perpendicular a la base y respetando 2 mm de material en todas las caras, b) vista de la pieza tras la operación de vaciado.

III. Desarrollo proyecto

Tras la operación de vaciado se debe reconstruir la base con 2 mm de material para que quede cerrada y con el mismo espesor en todas las paredes. Para ello se define un plano en la base y a partir de las aristas existente se realiza una operación de extrusión de 2 mm.

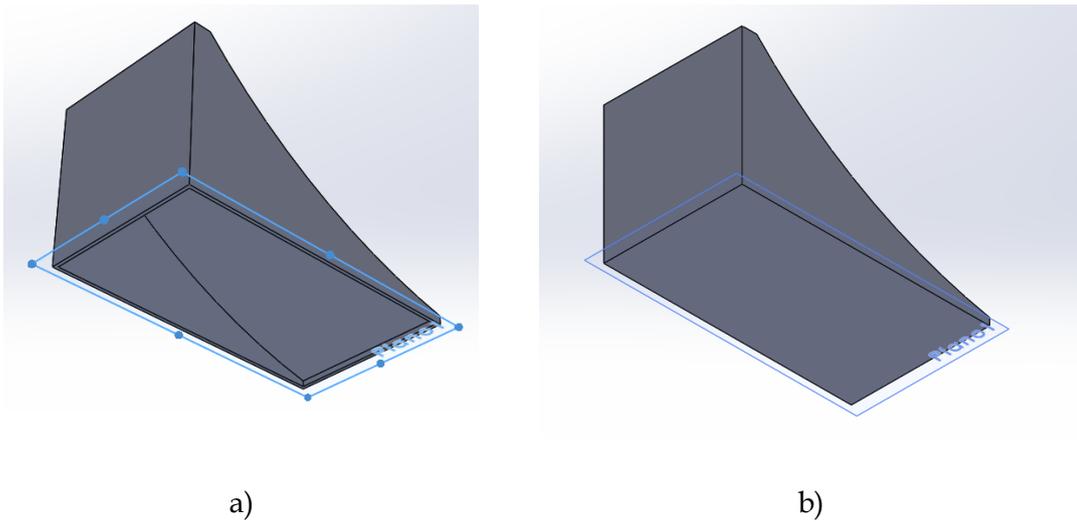


Figura III.6 a) Definición de un plano coincidente con la base, b) operación de extrusión con una profundidad de 2mm utilizando las aristas croquizadas sobre el plano.

Finalmente, con una vista de sección se aprecia el resultado definitivo, una cuña hueca con un espesor de 2mm en todas sus paredes.

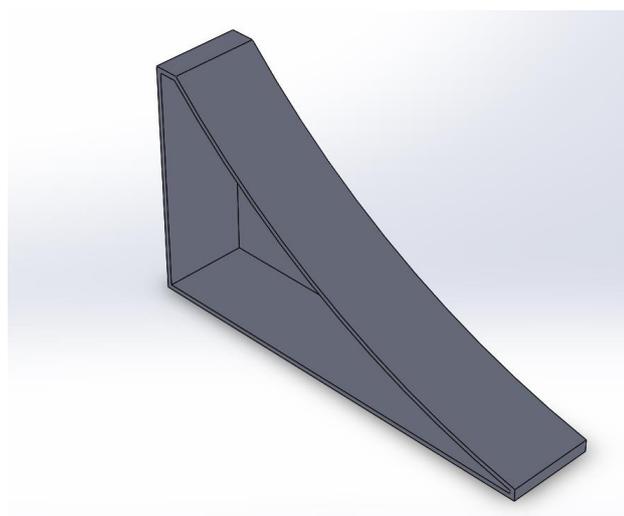


Figura III.7 Vista de sección del prototipo de cuña hueca.

III. Desarrollo proyecto

III.1.3. Cuñas con patrón de relleno determinado

Se ha mencionado en varias ocasiones este término anteriormente, pero ¿qué es el patrón de relleno? Inicialmente, se va a tratar de explicar este término, para, una vez comprendido, proceder a diseñar dos prototipos con diferente patrón de relleno.

El relleno, o infill, se trata de un parámetro que se introduce en el SLICER o laminador previamente a la impresión de la pieza, en donde el usuario elige como quiere que sea la estructura interna de la pieza. La importancia de escoger entre las diferentes opciones de patrones de relleno reside en la funcionalidad que tenga, puesto que los patrones más complejos generalmente presentarán mejores resistencias mecánicas, pero serán más complejos de imprimir, y por tanto requerirá más tiempo.

Actualmente, en los programas de laminado se puede seleccionar entre una gran cantidad de patrones, como pueden ser rectangular, de rejilla, triangular, panel de abeja, trihexagonal, etc. En este trabajo se va a trabajar con el patrón de rejilla, ya que es un patrón sencillo pero que otorga buena resistencia; y con el patrón trihexagonal, para tratar de ver la diferencia entre uno y otro con el aumento de complejidad en la estructura interna, ya que este patrón es muy complicado de recrear, pero las propiedades que confiere a la pieza son excelentes. En la siguiente figura se puede apreciar una muestra de estos patrones.

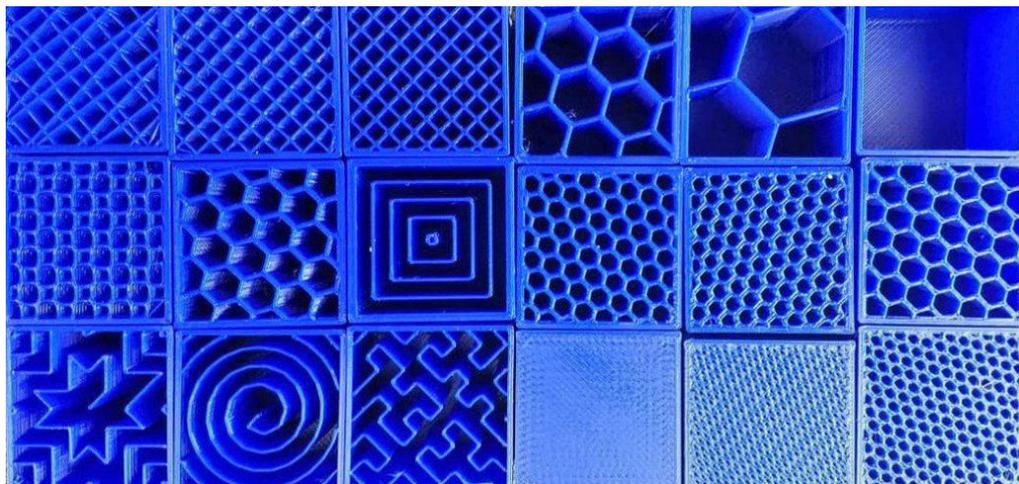


Figura III.8 Muestra de algunos de los patrones o infill con los que realizar el relleno de piezas para impresión en 3D (1).

III. Desarrollo proyecto

Otro parámetro que hay que tener en cuenta a la hora de proceder a imprimir una pieza es su porcentaje de relleno. El software de slicer solicita al usuario que indique el porcentaje de relleno que quiere que ponga en la pieza, es decir, la densidad de material que va a haber en el interior de la pieza. Es algo obvio, pero a mayor porcentaje la pieza va a tener una mejor resistencia, pero también un mayor peso, coste de material y tiempo de impresión. Este porcentaje puede variar desde el 0% hasta el 100%, donde se obtendrá una pieza sólida, y donde el patrón seleccionado no afecta a las características finales, simplemente servirá para “ordenar” los movimientos del cabezal.

En la siguiente figura se puede apreciar como aumenta la densidad de material y estructuras con el aumento del porcentaje. En este caso se trata de un patrón de rejilla, idéntico al que se usará para uno de los prototipos de este trabajo, descrito en el siguiente apartado.

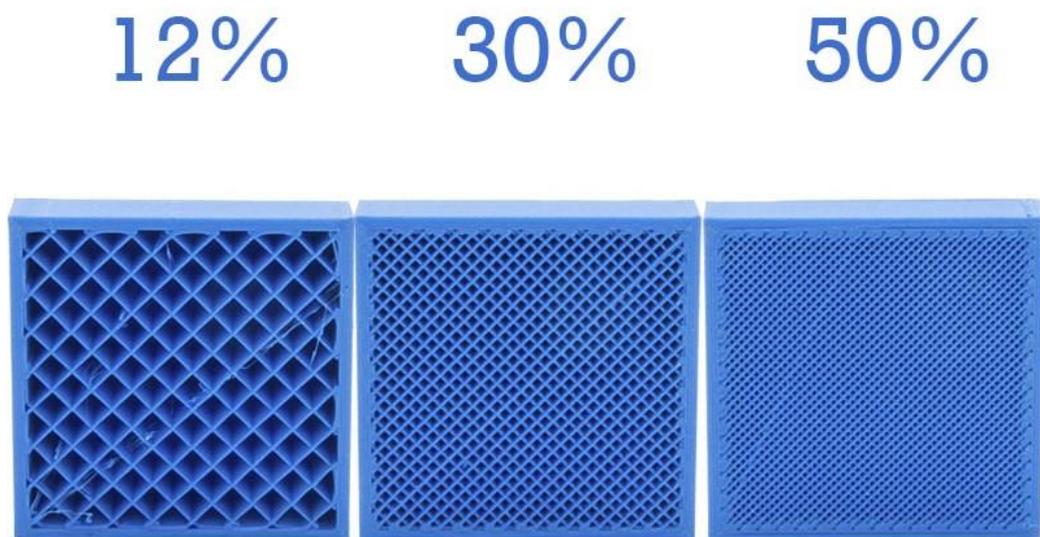


Figura III.9 Muestra de algunas opciones de porcentaje de relleno para unas piezas con patrón de relleno tipo rejilla (1).

III. Desarrollo proyecto

Llegados a este punto del trabajo, surgió una duda. ¿Cómo hacer para poder transferir los patrones que crea el SLICER a SolidWorks para realizar las simulaciones? La idea inicial era rápida y sencilla, dibujar en el programa de CAD el prototipo sólido, como se ha hecho en el apartado III.1.1., crear el archivo STL e introducirlo en el laminador, una vez escogido el patrón de relleno y el porcentaje, exportar ese archivo de nuevo al CAD para realizar las simulaciones. Para esta prueba se ha utilizado el programa PrusaSlicer, un laminador gratuito al alcance de todos los usuarios. Primeramente, se abre con el SLICER el archivo .STL y se seleccionan los parámetros de la pieza final: el patrón y el porcentaje de relleno, la altura de capa, el grosor de las paredes, la temperatura de la boquilla y de la cama, la velocidad de impresión, etc. Tras introducir estos parámetros, se ejecuta la laminación y se obtiene el archivo g-code. Lo que se ha intentado es convertir este archivo g-code en un archivo de tipo .OBJ, que es un formato de datos simple que representa solo la geometría 3D de la pieza, para, a continuación, introducirlo en el programa CAD. Sin embargo, la información que contenía este archivo era tan compleja que SolidWorks no era capaz de interpretarla.

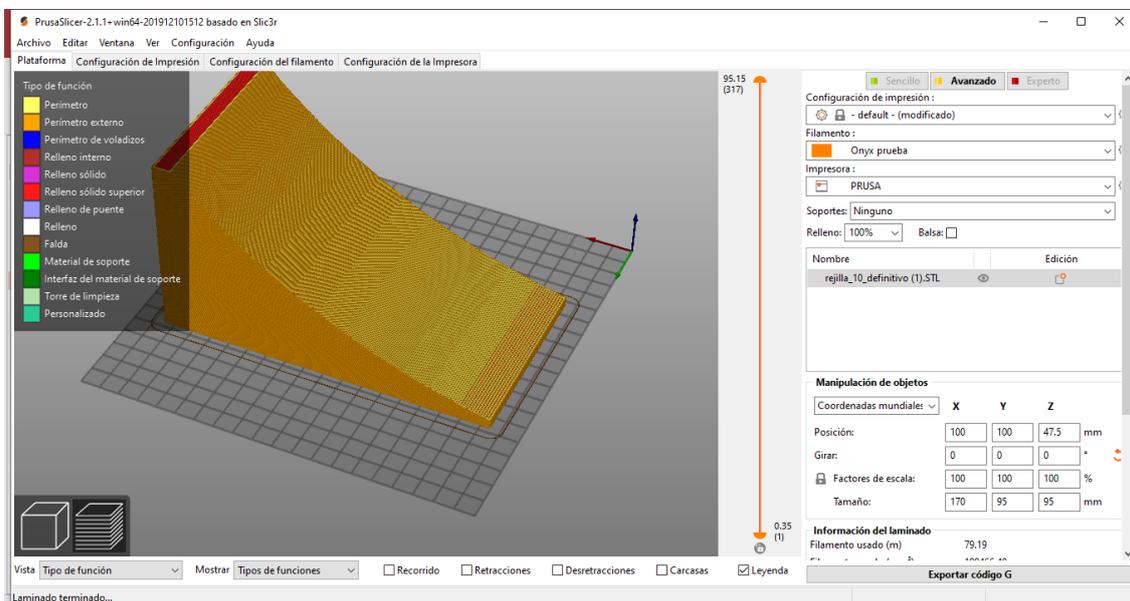


Figura III.10 Introducción del archivo STL en el software PusaSlicer.

III. Desarrollo proyecto

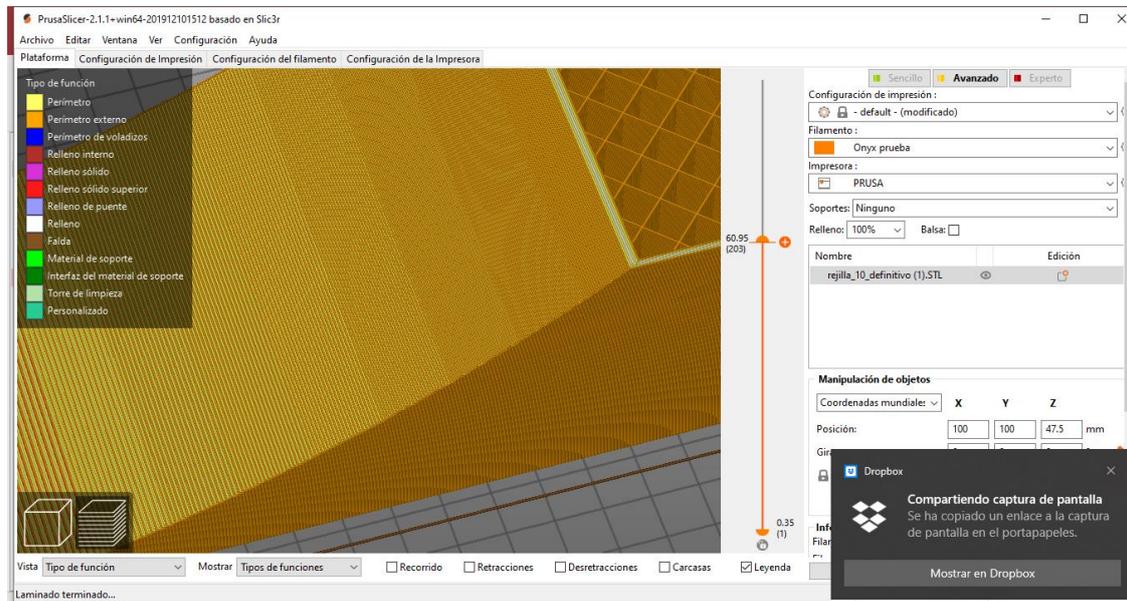


Figura III.11 Pieza obtenida tras la introducción de los parámetros.

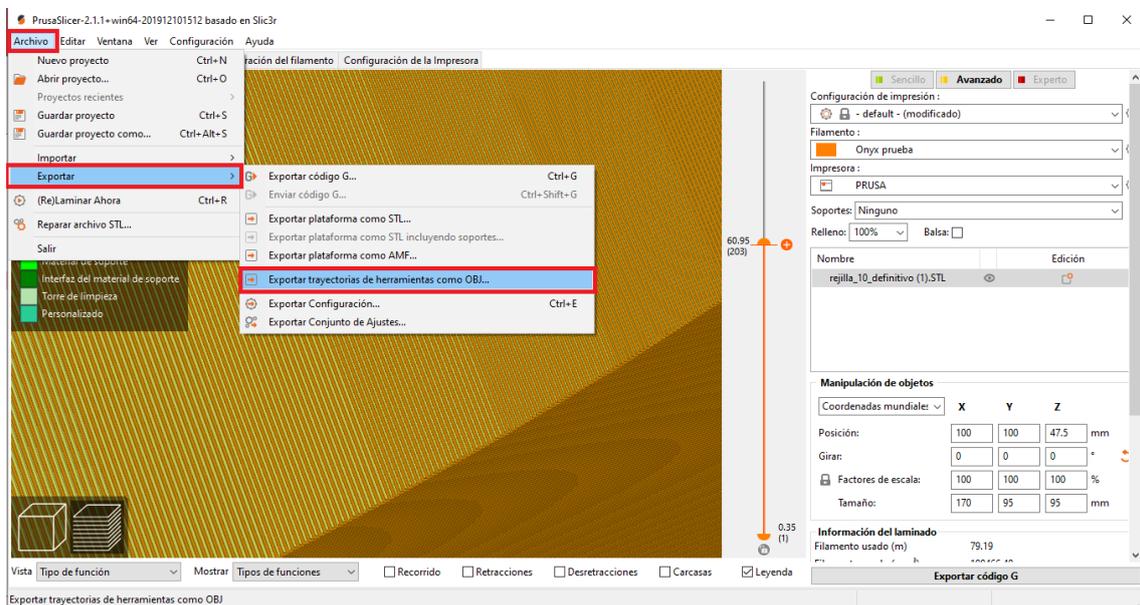


Figura III.12 Exportar el archivo al software de CAD mediante un archivo tipo OBJ

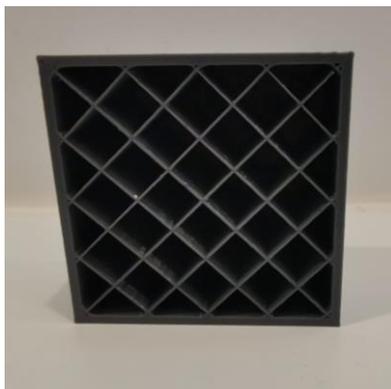
Se trató de buscar alternativas y una de las primeras conclusiones que se obtuvo es que hay muy pocos programas que incluyan un simulador para piezas impresas mediante FDM con un patrón y porcentaje determinado. Por ello se pensó en una

III. Desarrollo proyecto

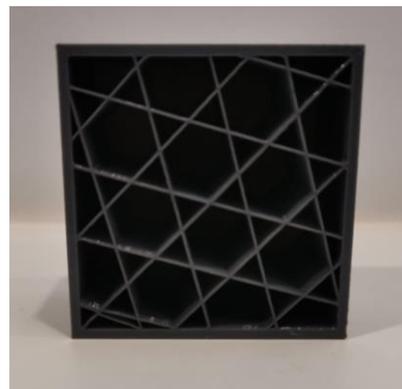
alternativa, y se decidió dibujar “a mano” el patrón sobre la base de la figura y realizar una extrusión, para acabar dándole la forma definitiva a la pieza. Además, se vio que, si este método funcionaba, cualquier usuario podría utilizarlo para ver si los parámetros que había escogido para su pieza eran apropiados para la funcionalidad que iba a tener.

La siguiente duda fue, ¿y cómo se puede obtener las dimensiones del patrón de la pieza? Esta duda venía fomentada por la dificultad de realizar el cálculo manualmente, puesto que cuando el usuario elige un patrón de relleno y un porcentaje en el SLICER, el software tarda unos segundos en calcularlo, pero realizar esos cálculos a manos sería muy complicado. Para solventar este problema, se decidió diseñar un cubo de 50x50x50 mm³. Este cubo fue introducido en el laminador y se parametrizó según lo deseado, realizando varias impresiones con los patrones de relleno y porcentajes deseados, indicando en los parámetros introducidos en el laminador que no pusiera capas superiores, logrando así disponer de modelos sobre los que poder medir directamente para replicarlos en SolidWorks.

En la siguiente figura se muestran los modelos que se emplearon en la realización del trabajo para poder medir sobre ellos y dibujar la estructura interna en el programa de CAD. Se decidió tener en cuenta también las desviaciones de la máquina en la medida de lo posible, como puede ser en el grosor de la pared, puesto que se apreció que era algo inferior en la realidad.



a)



b)

Figura III.13 a) Molde de patrón de rejilla al 10% de relleno, b) Molde de patrón trihexagonal al 10% de relleno.

III. Desarrollo proyecto

III.1.3.1 Cuña rellena con patrón de rejilla al 10%

Una vez determinada la manera de trabajar, se procede como se ha indicado anteriormente. Lo primero, se debe crear un rectángulo en el plano correspondiente a la base de la pieza con las cotas de la cuña modelo, se recuerda que era $95 \times 170 \text{ mm}^2$. Se procede a dibujar en su interior otro rectángulo equidistante 2 mm en todos sus puntos, por lo que medirá $91 \times 166 \text{ mm}^2$, con lo que se crearán las paredes de 2mm cuando se extruya.

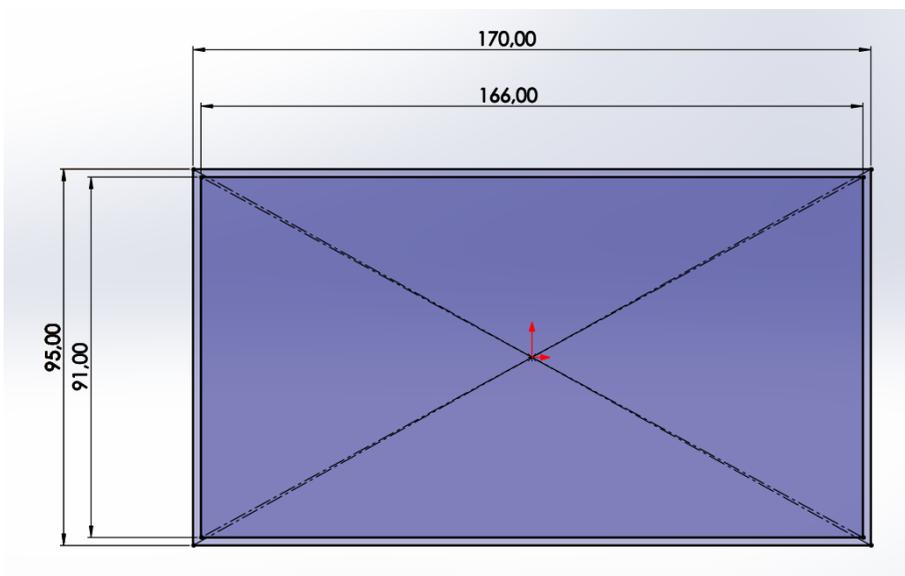


Figura III.14 Definición de las dimensiones de la base.

Una vez concluido esto, se observa sobre el modelo que una de las paredes recorre la diagonal, por lo que se determina que las paredes se disponen a 45° . Se acota un punto sobre el largo a 91 mm de uno de los vértices para dibujar una diagonal. Se crea una copia de esta entidad a 0,75 mm en cualquiera de las direcciones sobre el eje x para simular el grosor de pared. Se mide sobre el modelo la distancia entre paredes determinando que es de 11 mm. Se realiza una matriz con tantas entidades como sea necesario hasta cubrir todo el rectángulo interior.

III. Desarrollo proyecto

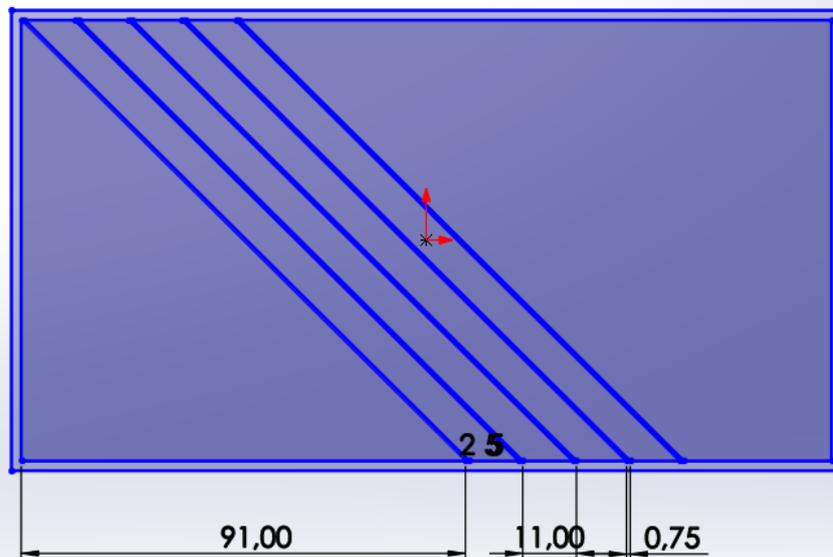


Figura III.15 Definición de las dimensiones de las paralelas a 135°.

A continuación, se repite la tarea, pero con líneas perpendiculares a estas, definiendo así la rejilla. Se procede a eliminar todos los segmentos sobrantes mediante la herramienta recortar entidades (hay que recordar que estamos recreando una rejilla, por lo que las paredes deben estar todas conectadas para que la extrusión se realice correctamente. Se recomienda, para que la labor no se haga muy tediosa, eliminar las partes sobrantes de una sección del diseño y mediante una matriz completarlo.

III. Desarrollo proyecto

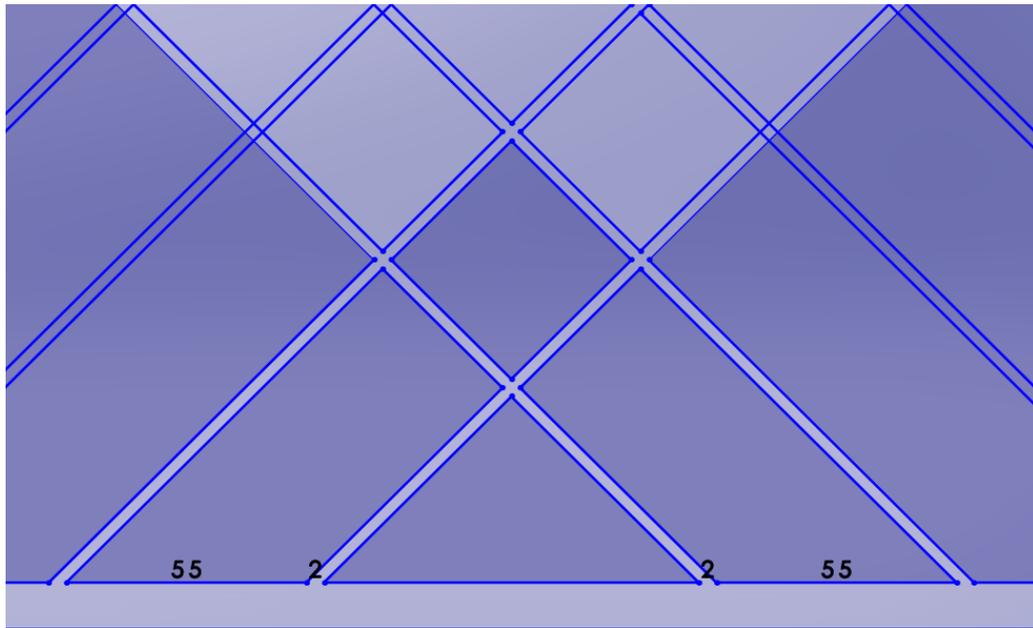


Figura III.16 Una vez que se dispone de la cuadrícula se debe recortar las líneas con la herramienta recortar entidades con el fin de obtener una rejilla con todas las paredes conectadas.

Una vez finalizada la matriz para cubrir todo el rectángulo interior y recortar las interacciones entre las paredes y el rectángulo, se procederá a realizar una extrusión de 91 mm en el eje y.

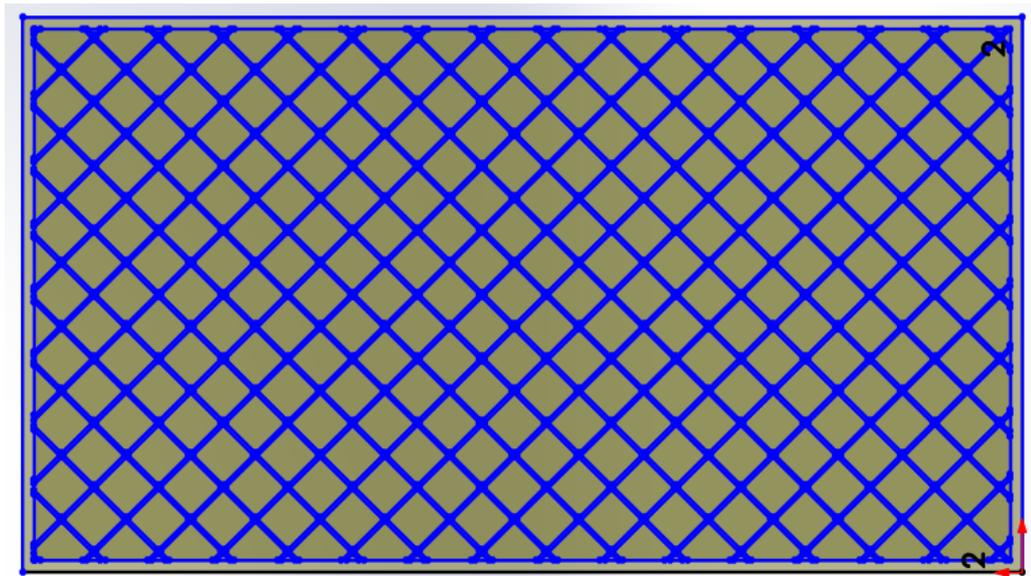


Figura III.17 Estructura interna del prototipo completamente definida.

III. Desarrollo proyecto

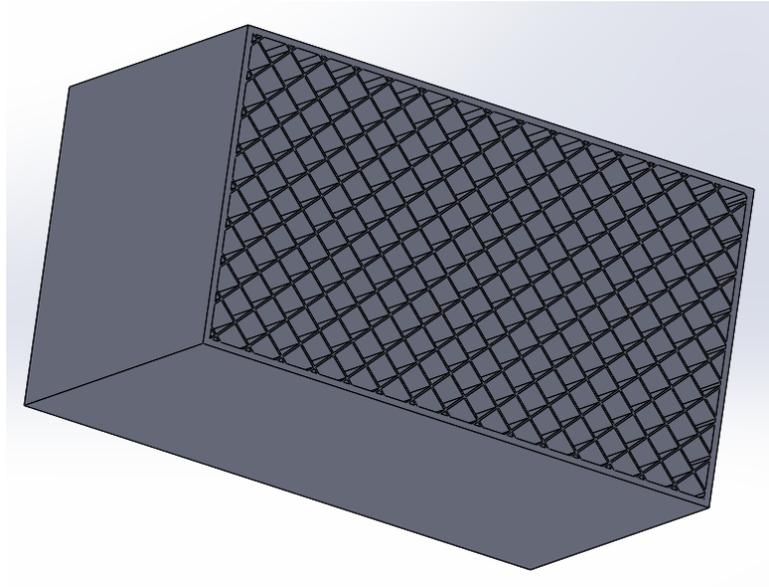


Figura III.18 Resultado tras la extrusión de 93mm del croquis de la figura III.14.

A continuación, se debe definir un plano sobre la base con el fin de extruir 2 mm de material en la dirección contraria al bloque para crear la base de 2mm inferior.

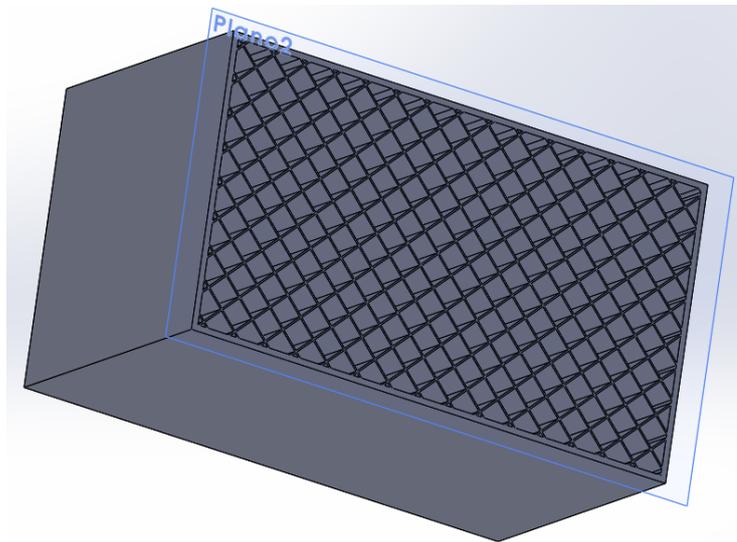


Figura III.19 Plano definido sobre la base, se dibuja sobre él el perímetro del rectángulo exterior y se realiza una extrusión de 2mm.

III. Desarrollo proyecto

Una vez se dispone del bloque cerrado inferiormente, se define en la parte superior otro plano para extruir los 2mm correspondientes a la parte superior, como se ha hecho en el caso anterior. Ahora, ya se dispone del prisma rectangular cerrado y con la estructura interna deseada. A continuación, se procede como en los anteriores prototipos a dibujar sobre un plano situado en uno de los laterales el arco de curvatura, eliminar el material sobrante y cerrarlo, para obtener así la pieza definitiva.

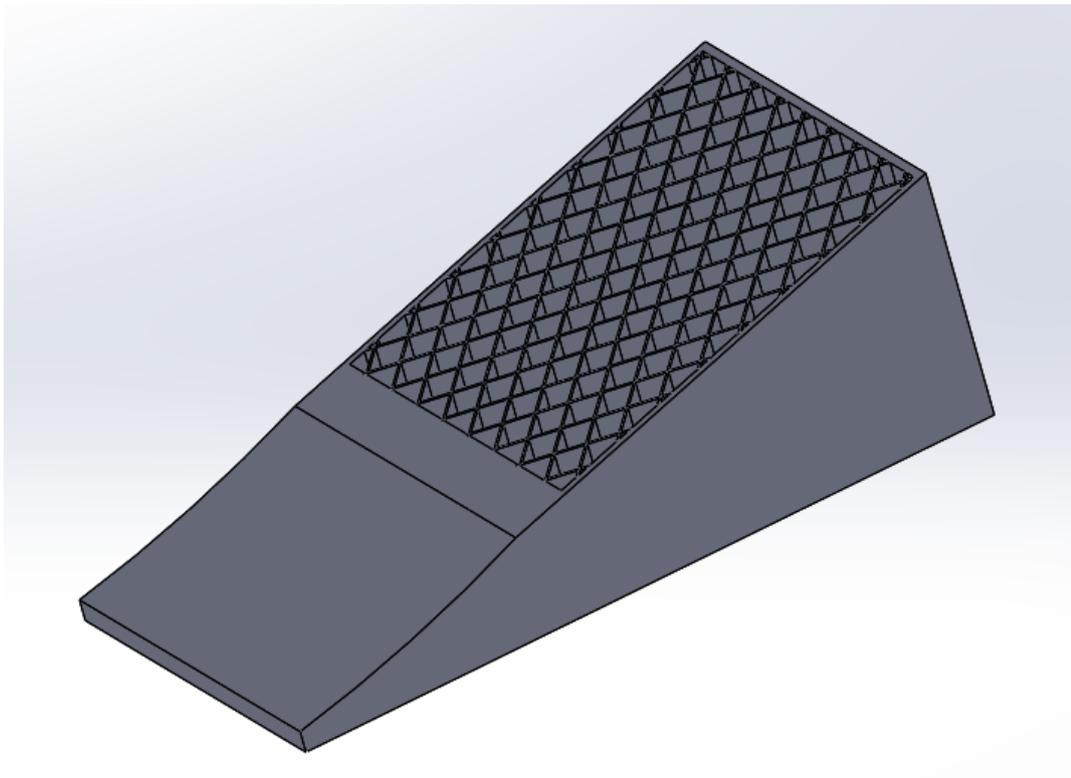


Figura III.20 Vista de sección del prototipo finalizado, donde se puede apreciar la estructura interna definida.

Se puede apreciar como realmente se ha logrado obtener una pieza idéntica a la que el SLICER mostraba una vez introducidos los parámetros.

III. Desarrollo proyecto

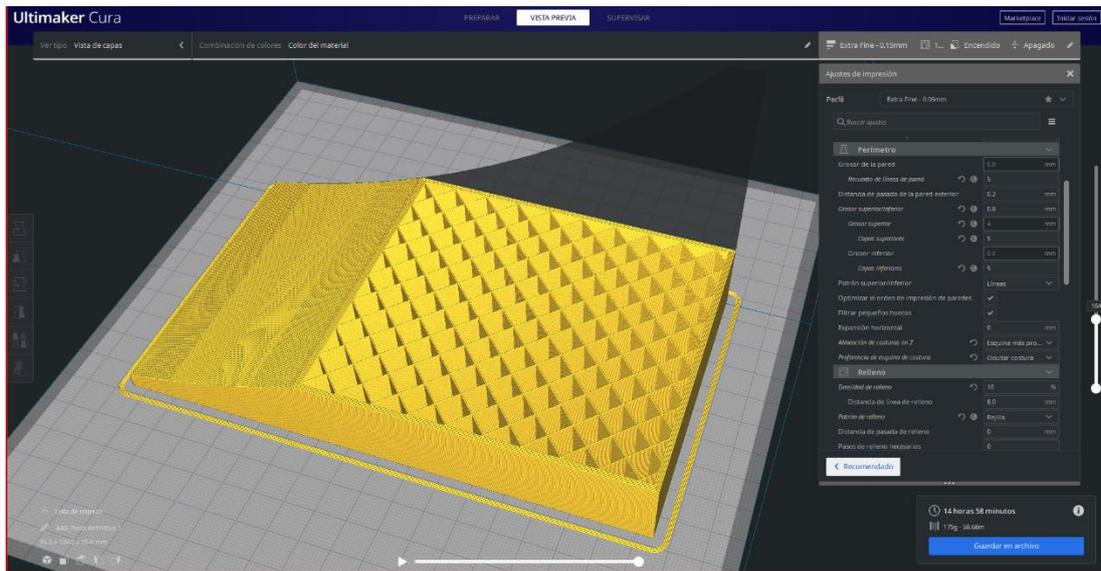


Figura III.21 Captura de pantalla del software UltimakerCURA con el que se realiza el laminado de los prototipos de este trabajo.

III.1.3.2 Cuña rellena con patrón trihexagonal al 10%

Para el diseño de relleno con patrón trihexagonal al 10%, o cualquier otro diseño que se quiera realizar, la metodología es idéntica. Identificar patrones de las figuras geométricas que los conforman, crear una unidad de patrón, y mediante una matriz replicarlo tantas veces como sea necesario para cubrir toda la base. Una vez se ha completado este paso, recortar las entidades que queden fuera del contorno que limita la base y recortar los segmentos de interacción entre patrón y pared del prototipo.

El proceder con esta metodología va a ahorrar mucho tiempo al usuario, pues como se verá a continuación, el siguiente patrón es mucho más complejo, puesto que tiene una gran cantidad de puntos, líneas y vértices.

Se empieza pues, dibujando una unidad de patrón sobre el croquis situado en la planta de la figura. Se puede apreciar que está compuesto por un hexágono como figura central, y 6 triángulos equiláteros en cada uno de sus lados. Midiendo sobre el modelo se observa que el hexágono mide 10.5 mm de lado a lado, y el lado del triángulo rectángulo será de 5.2 mm. También podemos observar que el patrón está conformado

III. Desarrollo proyecto

por 3 patrones de líneas paralelas equidistantes cada una con un grado de pendiente. Midiendo sobre el modelo se observa que estas pendiente son de 15° , 75° y 135° . Con estas medidas junto a las del hexágono se podrá dibujar la unidad de patrón, teniendo en cuenta que hay que realizar un doble dibujo para simular las paredes de la estructura final.

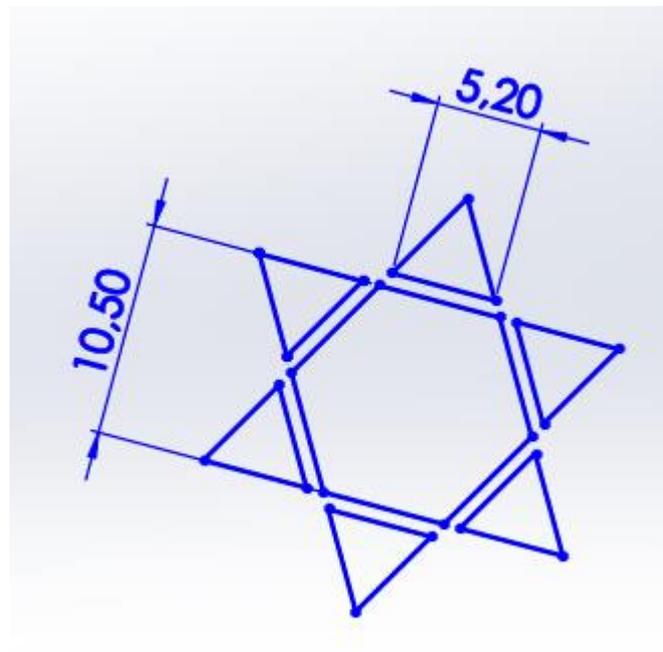


Figura III.22 Unidad de patrón compuesta por un hexágono y 6 triángulos equiláteros.

Una vez que se dispone de esta unidad de patrón y mediante la herramienta matriz, se rellena el rectángulo interior de la base, de medidas $91 \times 166 \text{ mm}^2$. Una vez finalizado se recortan las entidades que quedan fuera del perfil de la base. No se debe olvidar eliminar después los segmentos que relacionan el rectángulo con el patrón de relleno para conectar todas las paredes entre sí.

III. Desarrollo proyecto

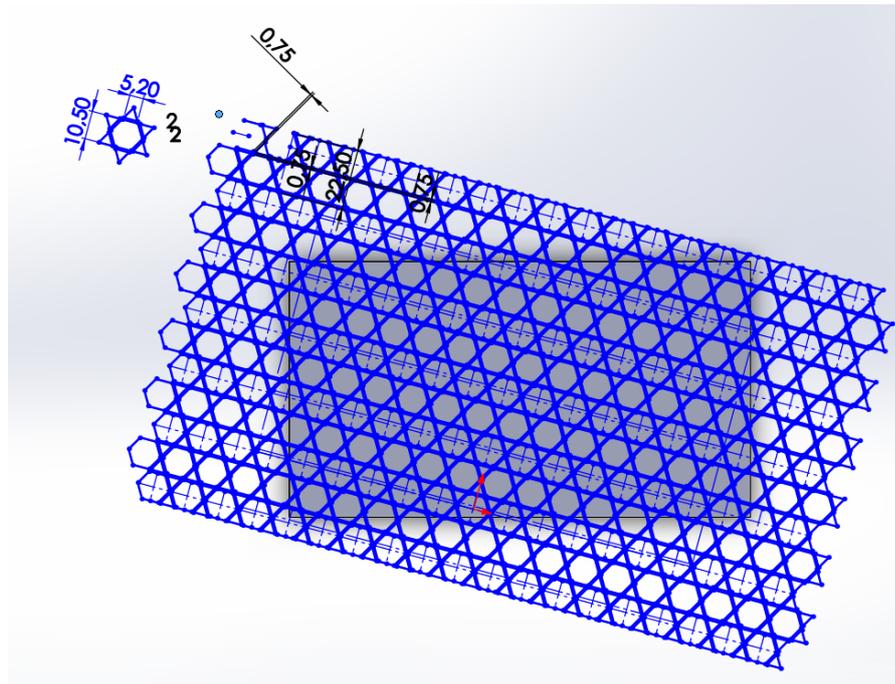


Figura III.23 Resultado obtenido tras ejecutar la matriz y previo paso a recortar las entidades que quedan fuera de los límites del prototipo.

Después de concluir el croquis, se procede a extruir 91 mm en la dirección perpendicular a la base y a completar el prototipo como se ha realizado con el prototipo de rejilla, cerrándolo tanto superior como inferiormente con una capa de 2mm realizando el corte con la profundidad total del elemento.

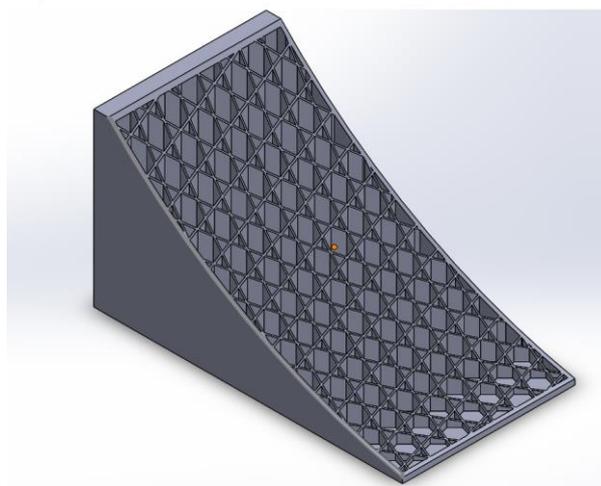


Figura III.24. Resultado que se obtiene tras realizar el corte a partir del arco.

III. Desarrollo proyecto

Extruyendo una nueva cubierta de 2 mm en la superficie que ha quedado abierta se logra finalizar la pieza, obteniendo así un calzo con la forma deseada y la estructura interna que se buscaba.

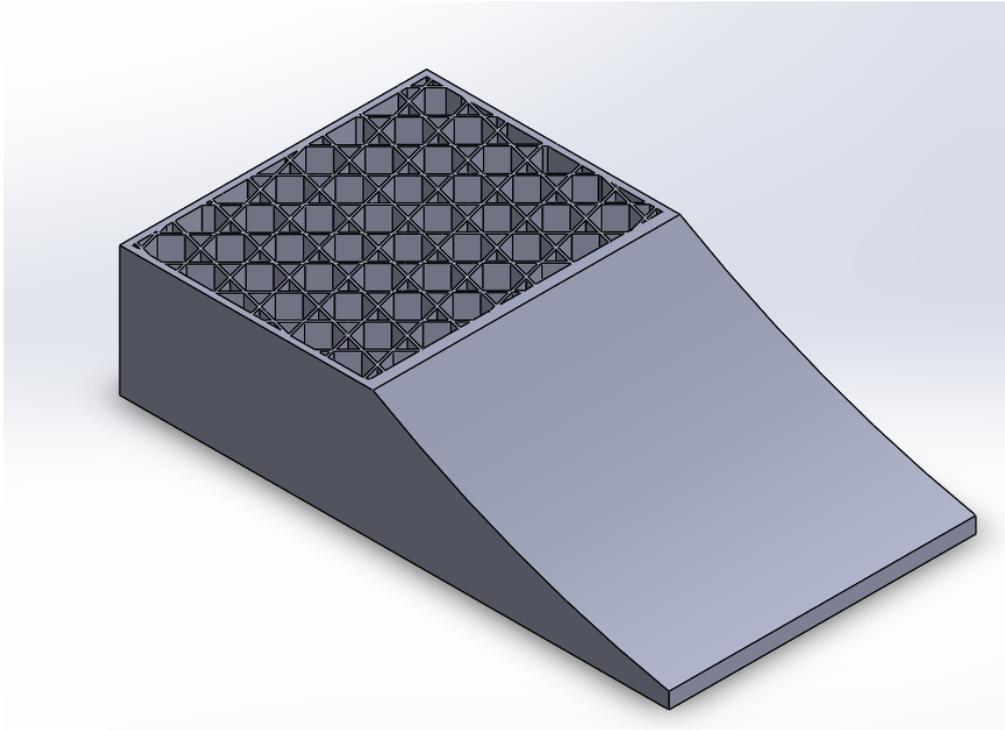


Figura III.25 Vista de sección del prototipo finalizado, donde se puede apreciar la estructura interna definida.

Comparando la pieza obtenida mediante el software de CAD con la imagen obtenida del laminador se aprecia como el resultado es el que se esperaba.

III. Desarrollo proyecto

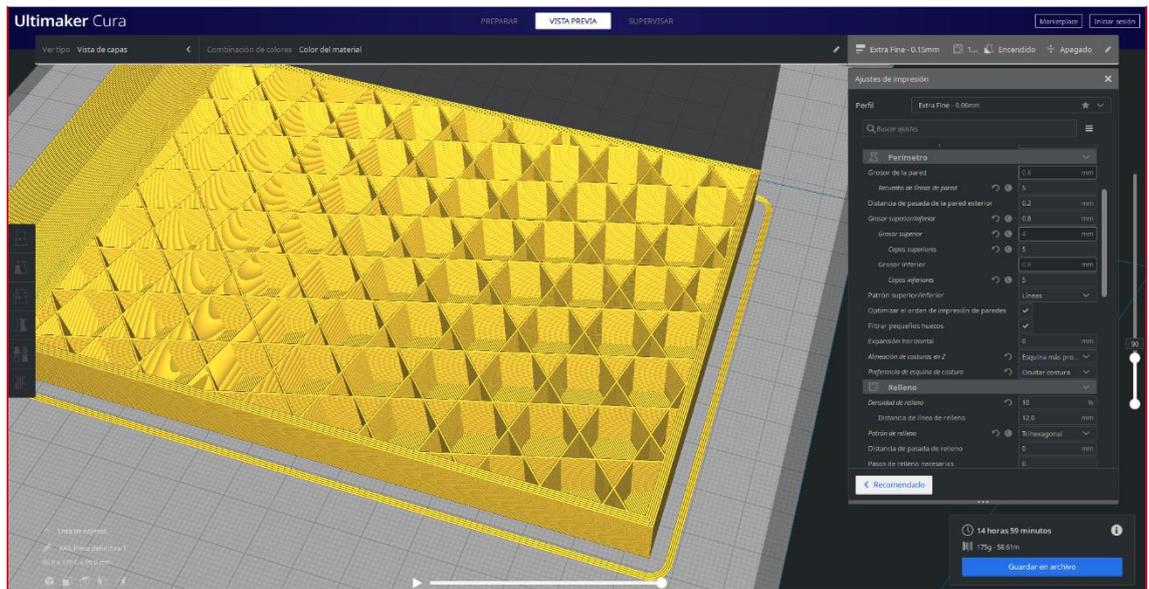


Figura III.26 Captura de pantalla del software UltiakerCURA con el que se realiza el laminado de los prototipos de este trabajo.

III. Desarrollo proyecto

III.2. NORMATIVA APLICABLE

DIN 76051-1:1992-11

Norma que regula las cuñas para vehículos a motor y remolques. DIN, acrónimo de Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización), es el organismo nacional de normalización alemana. La publicación data del 1 de noviembre de 1992 con vigencia actual. Se localiza dentro del apartado dedicado a “otros sistemas para vehículos de carretera”. Reemplaza a las normas DIN 76051-1(1975-07), DIN 76051-1(1988-07), VG 76051(1977-12) (3).

UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020

Normativa reguladora de la fabricación aditiva. Esta norma hacer referencia a aspectos como el diseño, los requisitos, las directrices y recomendaciones. UNE (acrónimo de Una Norma Española), es el organismo nacional de normalización español (4).

UNE-EN- ISO/ASTM 52921:2017

Terminología normalizada para la fabricación aditiva. Sistemas de coordenadas y métodos de ensayo (5).

UNE-EN ISO/ASTM 52915:2017

Norma para el formato de archivo para la fabricación aditiva (AMF)(ISO/ASTM 52915:2016) (5).

III. Desarrollo proyecto

UNE-EN ISO 17296-2:2017

Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas. (ISO 17296-2:2015) (5).

UNE-EN ISO 17296-3:2017

Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Características principales y métodos de ensayo correspondientes. (ISO 17296-3:2014) (5).

UNE-EN ISO 17296-4:2017

Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 4: Visión general del intercambio de datos. (ISO 17296-4:2014) (5).

UNE-EN ISO 3167:2014

Plásticos. Probetas de usos múltiples. (ISO 3167:2014) (5).

III. Desarrollo proyecto

III.3. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES

En este apartado se realizará un estudio sobre la forma en la que trabaja el producto. Se va a realizar un estudio de tensión estática, ya que no se contempla ningún movimiento en la pieza. Para el estudio estático no se va a tener en cuenta la fuerza de rozamiento entre el calzo y la pendiente, puesto que, para observar mejor los resultados, y como se explicará en próximos apartados, se supondrá que el calzo está anclado a la pendiente.

Primeramente, se va a estudiar las relaciones entre el calzo, el vehículo y la pendiente. Para ello se debe conocer el porcentaje de pendiente en el que se estaciona el vehículo y la masa de este. Como se viene realizando en este trabajo, se va a utilizar la masa de un Toyota Corolla, que según el permiso de circulación será de 1160 kg. La pendiente con la que se va a trabajar tomará diferentes valores con el fin de poder realizar diferentes simulaciones y poder obtener un abanico de resultados que permita llegar a diferentes conclusiones sobre el diseño final de la pieza para diferentes situaciones. Estos valores a priori oscilarán entre pendientes de 5° a 15°, valor que se conocerá como α .

A continuación, se muestra el cálculo para determinar el peso del vehículo:

$$p \text{ (N)} = m \text{ (kg)} * g \text{ (m/s}^2\text{)} \longrightarrow p = 1160 * 9.81 = 11379.6 \text{ N}$$

Una vez se ha determinado el peso, se procede a estudiar la fuerza resultante. Como se muestra en la siguiente figura, en el caso planteado se van a dar dos fuerzas: el peso, previamente calculado; y la fuerza normal. Se va a descomponer el peso en sus componentes, que se llamarán F_x y F_y , puesto que se debe conocer el valor de F_x para el estudio estático. F_y no aportará ningún tipo de información al estudio, pero se indica que coincidirá con la fuerza normal.

III. Desarrollo proyecto

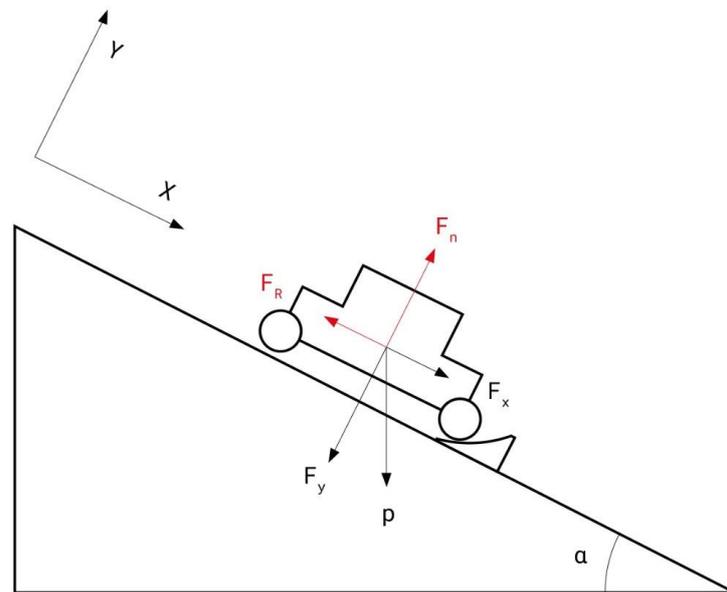


Figura III.27 Diseño gráfico de las fuerzas que actúan sobre el vehículo en la pendiente. Se aprecia como actúa el peso, la descomposición de este, la fuerza normal y la de rozamiento que contrarresta F_x

$$p \begin{cases} F_x = p * \text{sen}(\alpha) \\ F_y = p * \text{cos}(\alpha) \end{cases} \rightarrow F_x = 11379.6 * \text{sen}(\alpha), \text{ para todos los valores que tome } \alpha.$$

A continuación, se estudiarán las fuerzas que actúan sobre el calzo. Como se muestra en la siguiente figura, se ha supuesto que van a actuar dos fuerzas, que son F_x , calculada en el apartado anterior, y se va a tener de nuevo en cuenta el peso del vehículo (en el esquema F_B), en esta ocasión hará referencia a la fuerza que ejercer sobre el calzo.

III. Desarrollo proyecto

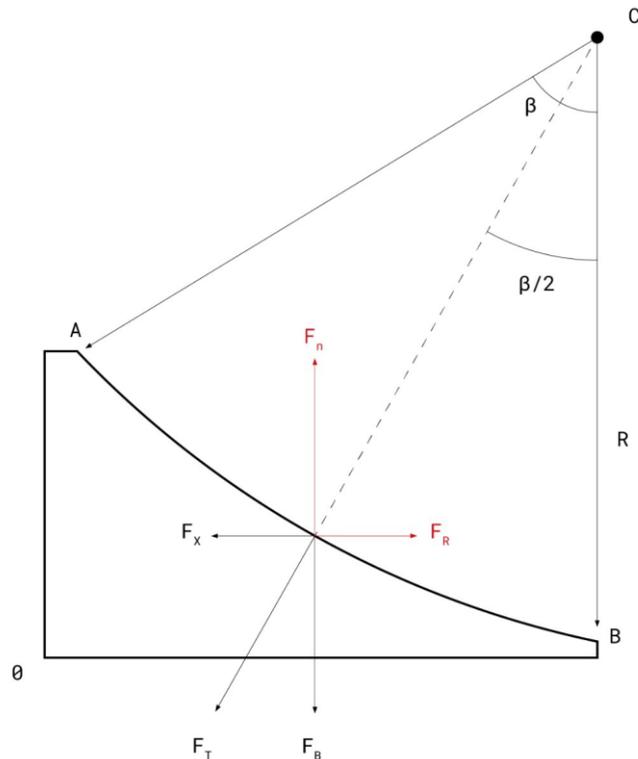


Figura III.28 Diseño gráfico de las fuerzas que actúan sobre el calzo. Se puede observar cómo actúa F_x , F_B y la fuerza resultante, que es F_T .

Para determinar la fuerza total, F_T , se debe conocer el valor de beta, a partir de ahora β , que corresponde al ángulo del arco sobre el que apoyará el neumático. Se conocen las coordenadas cartesianas para los puntos A (10, 95); B (170, 5) Y C (233'88, 305'79), localizándose el centro origen de coordenadas O (0, 0) localizado en el vértice inferior izquierdo de la cuña tal y como indica la figura anterior.

Siguiendo con el procedimiento para el cálculo de β se procederá a determinar los vectores \vec{CA} y \vec{CB} .

$$\vec{CA} = (A_x - C_x); (A_y - C_y);$$

$$\vec{CB} = (B_x - C_x); (B_y - C_y);$$

$$\vec{CA} = (10 - 233.88); (95 - 305.79) = (-223.88; -210.79)$$

$$\vec{CB} = (170 - 233.88); (5 - 305.79) = (-63.88; -300.79)$$

III. Desarrollo proyecto

Una vez determinados \vec{CA} y \vec{CB} , se empleará la fórmula para el cálculo del ángulo entre dos vectores. Para ello se debe conocer el producto escalar de \vec{CA} y \vec{CB} , y sus módulos.

PRODUCTO ESCALAR

$$\vec{CA} \times \vec{CB} = (-63.88; -300.79) \times (-223.88; -210.79) = 77704.9785$$

MÓDULOS:

$$|\vec{CA}| = \sqrt{(CA_x)^2 + (CA_y)^2} = 307.498$$

$$|\vec{CB}| = \sqrt{(CB_x)^2 + (CB_y)^2} = 307.498$$

Ya se puede calcular el valor de β :

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\vec{CA} \times \vec{CB}}{|\vec{CA}| \times |\vec{CB}|} = 34.735^\circ$$

Una vez se ha calculado β y volviendo a la figura anterior, se deduce que la composición de fuerzas será:

$$F_x = F_T \times \sin \frac{\beta}{2}$$

$$F_T = \frac{F_x}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

Tras llegar a esta conclusión, solo queda añadir que, como se ha explicado previamente, se van a tomar diferentes valores para la pendiente, por lo que F_x será diferente en cada una de las simulaciones, y, por lo tanto, aunque β permanece constante, el valor de F_T también variará en cada simulación.

III. Desarrollo proyecto

III.4. SELECCIÓN DE MATERIALES

En la introducción se ha realizado un acercamiento a los materiales que emplea principalmente el modelado por deposición fundida. En ese apartado se ha destacado la importancia del PLA (Ácido Poliláctico), del PET (Tereftalato de Polietileno) y del ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Dada la importancia de estos polímeros en el campo de la impresión 3D, puesto que, como ya se ha indicado, son los más empleados en la actualidad, se van a realizar una serie de simulaciones sobre los prototipos para ver cómo afecta a los resultados finales el material que se emplee. Una vez analizados los resultados, se centrará el estudio en el que se considere como más favorable.

La herramienta de simulación “Simulation” de SolidWorks que se va a emplear trae de serie una biblioteca con algunos materiales como son aceros, hierros, aleaciones, fibras y plásticos. Dentro de esta biblioteca se puede localizar dos de los tres materiales que se van a emplear, el ABS y el PET.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2960000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.37	N/D
Módulo cortante		N/m ²
Densidad de masa	1420	kg/m ³
Límite de tracción	57300000	N/m ²
Límite de compresión	92900000	N/m ²
Límite elástico		N/m ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.261	W/(m·K)

Figura III.29 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del PET.

III. Desarrollo proyecto

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2000000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	318900000	N/m ²
Densidad de masa	1020	kg/m ³
Límite de tracción	30000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico		N/m ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)

Figura III.30 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del ABS.

Sin embargo, en la biblioteca no viene registrado el PLA, por lo que debe ser introducido manualmente para la realización del trabajo. Para ello primeramente se deben buscar las propiedades mecánicas del PLA y crear en la biblioteca un material personalizado.

Hay muchas webs que ofrecen información sobre materiales poliméricos, como puede ser CampusPlastic (12) o MatWeb (6). A veces no es sencillo encontrar los datos deseados, puesto que, en los polímeros principalmente, las propiedades pueden oscilar en un rango de valores según las condiciones del estudio. Por ello se ha procedido a buscar las propiedades específicas de un PLA para impresión 3D con las que poder crear el material en SolidWorks. En este caso se van a utilizar los datos que pertenecen al polímero “Stratasys PLA 3D Printing Polymer” (6).

III. Desarrollo proyecto

Physical Properties	Metric	English	Comments
Specific Gravity	1.264 g/cc	1.264 g/cc	ASTM D792
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	26.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	3770 psi @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
	48.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	6960 psi @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
Tensile Strength, Yield	26.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	3770 psi @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
	45.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	6530 psi @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
Elongation at Break	1.00 % @ Thickness 3.17 mm	1.00 % @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
	2.50 % @ Thickness 3.17 mm	2.50 % @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
Elongation at Yield	1.00 % @ Thickness 3.17 mm	1.00 % @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
	1.50 % @ Thickness 3.17 mm	1.50 % @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
Tensile Modulus	2.539 GPa	368.3 ksi	ZX axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
	3.039 GPa	440.8 ksi	XZ axis, Type 1, 0.2"/min, ASTM D638
Flexural Strength	45.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	6530 psi @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
	84.0 MPa @ Thickness 3.17 mm	12200 psi @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
Flexural Modulus	2.47 GPa @ Thickness 3.17 mm	358 ksi @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
	2.93 GPa @ Thickness 3.17 mm	425 ksi @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
Flexural Strain at Break	1.90 % @ Thickness 3.17 mm	1.90 % @ Thickness 0.125 in	ZX axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
	4.10 % @ Thickness 3.17 mm	4.10 % @ Thickness 0.125 in	XZ axis, Method 1, 0.05"/min, ASTM D638
Izod Impact, Notched	0.270 J/cm	0.506 ft-lb/in	Method A, XZ axis, ASTM D256
Izod Impact, Unnotched	1.92 J/cm	3.60 ft-lb/in	Method A, XZ axis, ASTM D256

Figura III.31 Captura de pantalla de la web MatWeb donde se puede encontrar información acerca de propiedades de diversos materiales. En este caso muestra las propiedades correspondientes al Stratasy PLA 3D Printing Polymer (6).

Con esta información, se procede a introducir los datos en la biblioteca de materiales y ya se puede simular con este material:

Propiedades de material

No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la b

Unidades: SI - N/m² (Pa)

Categoría: Plástico

Nombre: PLA

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: No definido Seleccionar...

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2539000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.385	N/D
Módulo cortante	2470000000	N/m ²
Densidad de masa	1264	kg/m ³
Límite de tracción	30000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	63500000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.13	W/(m·K)

Figura III.32 Captura de pantalla correspondiente a las propiedades del PLA (7) (8) .

III. Desarrollo proyecto

III.5. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO

Como ya se ha mencionado en diferentes apartados anteriores, los prototipos con los que se va a trabajar están pensados para ser fabricados mediante tecnología de fabricación aditiva, es decir, impresión 3D. Aunque durante el proceso de deposición de material por capas se puede dar el caso de que se produzcan imperfecciones por parte de la máquina con la que se está trabajando, lo que ocasione que en algunos puntos de la pieza final se den pequeños desajustes entre las capas que han dado lugar a la misma, para las simulaciones se va a trabajar con la pieza como un sólido perfecto, en el que no se localiza ninguna unión, soldadura o desajustes.

También se debe hacer referencia a las fuerzas que se van a dar entre el calzo y el entorno, donde destacan dos fuerzas de rozamiento.

La primera de ellas se trataría de la fuerza de rozamiento que se daría entre la base del calzo y la superficie de la pendiente. Esta fuerza de rozamiento debe ser igual a F_x , que se ha calculado previamente, y con dirección contraria a esta. En las simulaciones de los prototipos no se ha tenido en cuenta, puesto que se va a tratar el calzo como si fuese una pieza anclada al suelo y que tenga, en este sentido, un comportamiento ideal. Además, la condición de anclado al suelo se utiliza asumiendo que se puede estudiar la rugosidad del material posteriormente para determinar un coeficiente de rozamiento específico. En este caso no va a ser necesario ese estudio ya que el calzo, al tener una fuerza vertical hacia abajo considerable, va a dar lugar a una fuerza de rozamiento, y junto al coeficiente que se estudiará a posteriori, será mayor que la fuerza horizontal ejercida por el vehículo. Esto hace suponer la no necesidad de un coeficiente de rozamiento alto para que el calzo actúe en la realidad como si se encontrase anclado.

La segunda fuerza de rozamiento sería la que se localiza entre la superficie del calzo y la rueda con la que se encuentra en contacto. En este caso esta fuerza no debería afectar al funcionamiento de la cuña, lo único que se debe tener en cuenta a la hora del diseño definitivo de la misma, es que en esta superficie debería contar con un relieve o

III. Desarrollo proyecto

rugosidad que le otorgue una fuerza de rozamiento mayor que la posible fuerza lateral que este ejerciera para salirse de la cuña.

Por último, se deben determinar las condiciones en las que se va a realizar la simulación. De nuevo, se debe de comprender que, en un supuesto real, las condiciones a las que está sometida la cuña como son temperatura, presión, condiciones atmosféricas u otros supuestos son muy variables. Como el objetivo general del trabajo es conocer cómo se comporta un mismo prototipo según el patrón de relleno y el material del que se fabrica, se ha decidido que el estudio estático se va a realizar en las condiciones que SolidWorks incorpora por defecto, con el fin de poder comparar los resultados de las diferentes simulaciones de una manera objetiva.

III. Desarrollo proyecto

III.6. SIMULACIÓN MEDIANTE FEM

El FEM o Método de los Elementos Finitos es un método empleado para la resolución de ecuaciones diferenciales complejas mediante el empleo de computadoras que permita al usuario resolver problemas físicos sobre geometrías. Es un método muy empleado en ingeniería, sobre todo en la etapa del prototipado y diseño ya que permite la optimización de este. La forma de operar de un FEM es mediante la división de un cuerpo, estructura o dominio en subdominios denominados elementos finitos, y estos a su vez en una serie de puntos representativos llamados nodos, que relacionados entre sí conforman una malla. Los nodos que pertenecen al mismo elemento finito son adyacentes, y teniendo en cuenta esta relación de adyacencia se puede relacionar el valor de un conjunto de variables definidas en los nodos, conocidas como grados de libertad. El software realiza un estudio en los nodos con las condiciones de contorno definidas y el valor del conjunto de variables perteneciente a este y estudia su propagación a nodos adyacentes mediante el mallado que se ha definido, resolviendo de forma numérica una ecuación diferencial con una gran cantidad de grados de libertad, algo que de forma analítica no sería posible por la complejidad que acarrearía, obteniendo un modelo con una exactitud cercana a la realidad.

III.6.1. Modelo FEM proyecto

Se realizará un análisis estático del comportamiento de los prototipos bajo condiciones de operación específicas. Este análisis calculará los efectos de las cargas constantes sobre la estructura de la pieza. Estos análisis pueden ser de esfuerzos lineales, con los que se calculan los esfuerzos y desplazamientos que sufre la geometría simulada, y se pueden ver efectos relacionados con fuerzas, presiones, temperaturas o contacto entre componentes. También existe la posibilidad de realizar un análisis de deformaciones, donde se aprecian los cambios que sufrirá la geometría.

Para llevar a cabo estos estudios, es preciso definir previamente el material para conocer las propiedades mecánicas, indicar los elementos de sujeción, introducir las

III. Desarrollo proyecto

cargas y fuerzas a las que está sometida la pieza y realizar un mallado para emplear el modelo de los elementos finitos.

III.6.1.1. Aplicación de las sujeciones

Como se ha visto en apartados previos, aunque en la realidad una cuña no se comporte de esta forma, puesto que habrá unos rozamientos entre su base y la superficie sobre la que se localice que provocarán unos deslizamientos, dependiendo del material de la superficie y de las características de la cara, se va a suponer que la cuña se encuentra anclada a la superficie, con el fin de poder simplificar las simulaciones.

Para introducir esta condición, se empleará la herramienta “Sujeciones”, que al seleccionarla se despliega un menú con diferentes opciones, entre ellas se escogerá “geometría fija”.

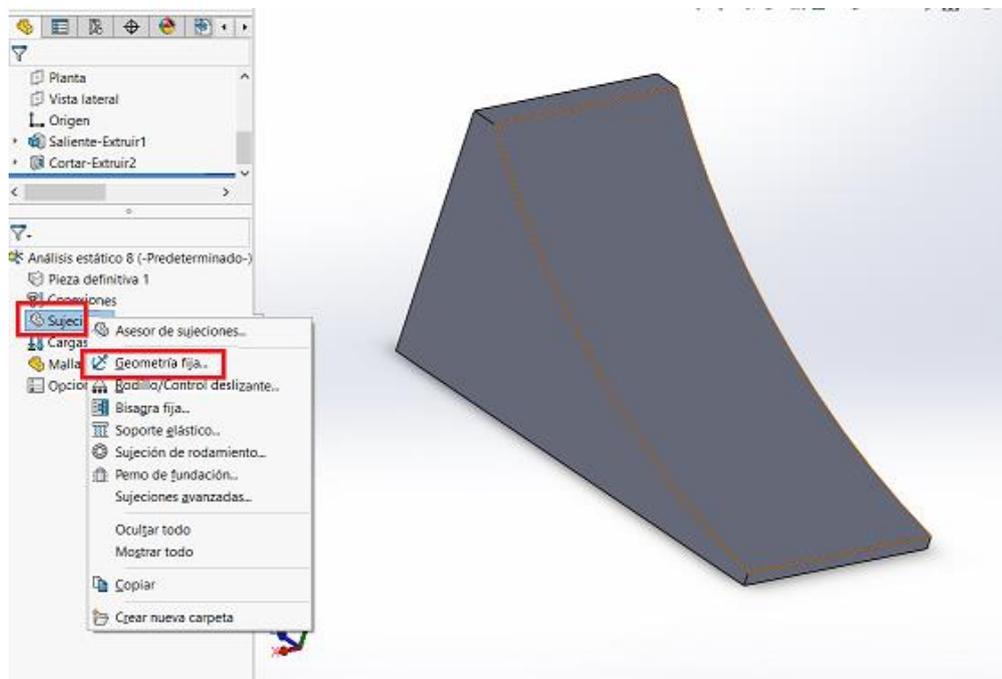


Figura III.33 Forma de proceder para introducir las condiciones de sujeción. En este caso, se indica que se trata de una geometría fija.

Tras indicar que se trata de una geometría fija se desplegará el menú de Sujeción, y dado que lo que se va a hacer es anclar, solo se debe seleccionar la base del calzo y aceptar.

III. Desarrollo proyecto

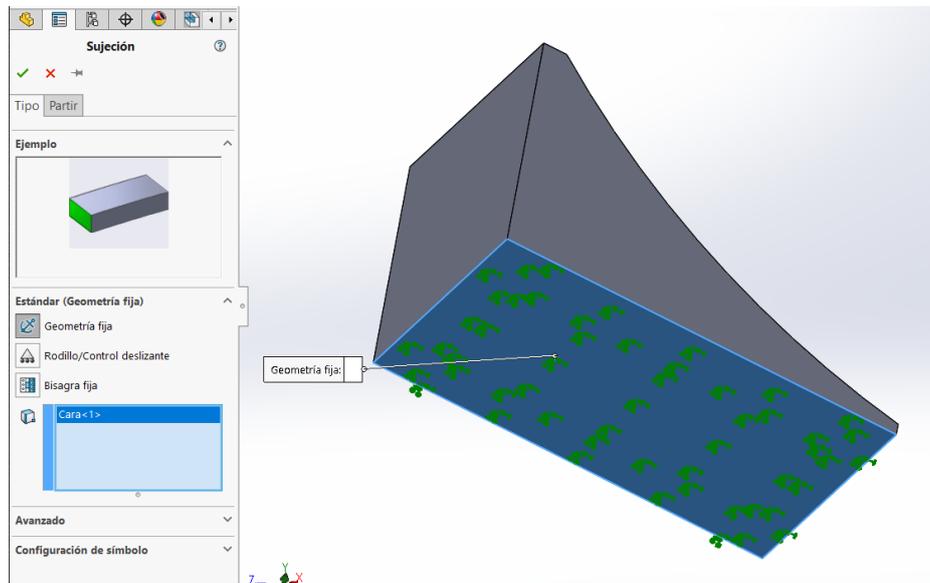


Figura III.34 Forma de proceder para introducir las condiciones de sujeción. Selección de la cara que va a ser anclada.

III.6.1.2. Aplicación de materiales

Para aplicar el material al prototipo en Simulation, se debe hacer click con el botón derecho sobre el archivo que se esta simulando y se desplegará una ventana donde se puede seleccionar la opción Aplicar/Editar material, tal y como muestra la siguiente figura.

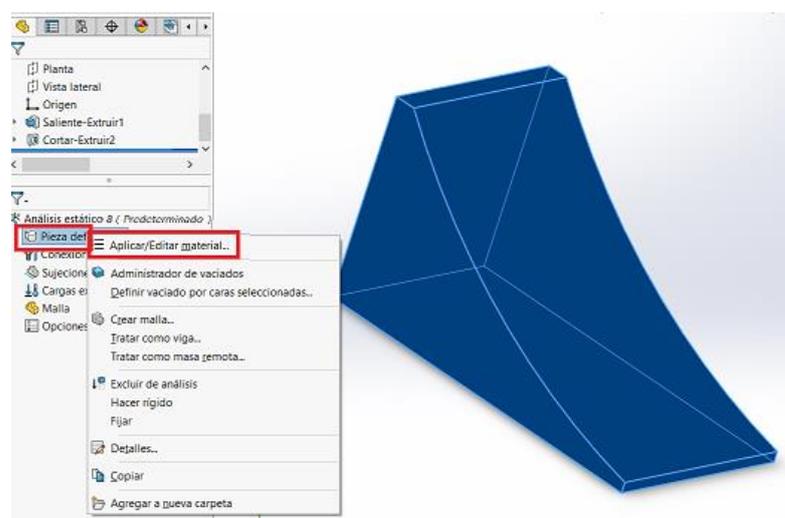


Figura III.35 Forma de proceder para asignar un material al prototipo. Despliegue del menú Aplicar/Editar material.

III. Desarrollo proyecto

Tras seleccionar la opción, se desplegará una ventana con la biblioteca de materiales que incorpora SolidWorks, incluyendo los materiales personalizados. Se debe navegar entre las pestañas desplegables hasta localizar el material buscado, seleccionarlo y hacer click sobre el botón de aplicar. Si no se localiza el material debe ser introducido manualmente.

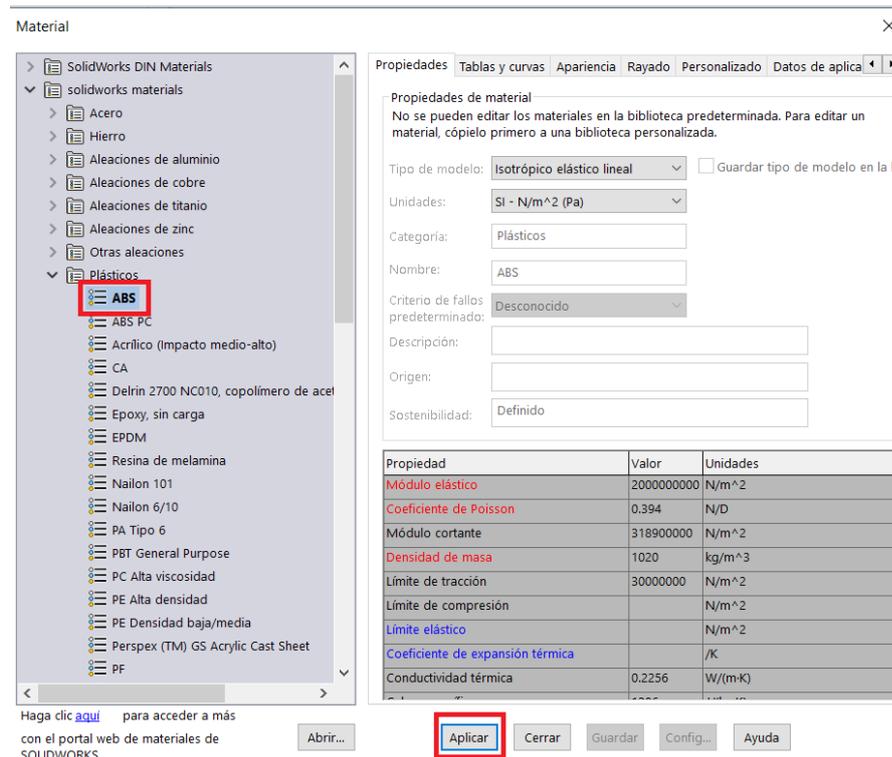


Figura III.36 Ventana desplegable con la biblioteca que incorpora SolidWorks de materiales. Seleccionar el deseado y aplicar.

III.6.1.3. Aplicación de estados tensionales

En el apartado III.3 se realizó el estudio del estado tensional en el que se encontraba el prototipo. Como se ha visto, este estado tensional va a variar según las diferentes condiciones de estudio, alteradas por la masa del vehículo y por la inclinación de la pendiente donde va a ser ensayado.

III. Desarrollo proyecto

Al final todo este estudio se reduce a una fuerza que se encuentra distribuida sobre la superficie de contacto entre el calzo y el neumático, y se introducirá en la simulación mediante la herramienta de cargas externas.

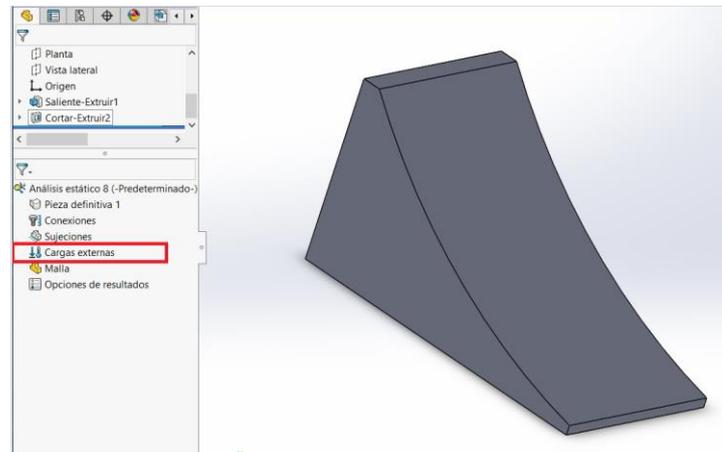


Figura III.37 Localización de la herramienta para introducir estados tensionales.

El proceso no es complicado, primeramente, se indicará que se trata de una fuerza, y como está distribuida se seleccionará la superficie mencionada. Se procede a introducir el valor de la fuerza según la simulación que se esté realizando y se acepta.

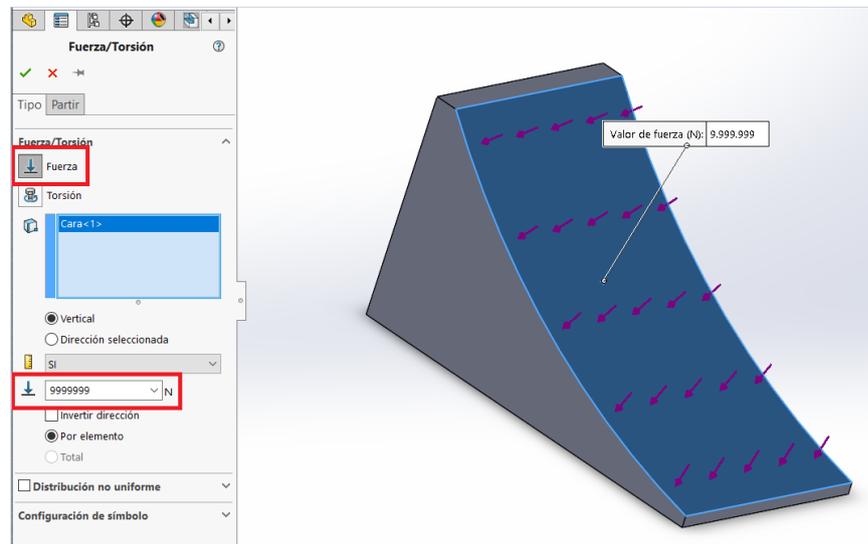


Figura III.38 Selección de la cara donde se desea que se ejerza la fuerza e introducción del valor de esta.

III. Desarrollo proyecto

III.6.1.4. Mallado del prototipo

Generalmente, una vez que ha introducido el material, las sujeciones y los estados tensionales se puede ejecutar la simulación, puesto que la propia ejecución procederá a mallar el prototipo para poder realizar los cálculos resistentes. Sin embargo, en este caso va a ser necesario introducir la malla manualmente, al menos en las piezas con un patrón de impresión definido, es decir, con la cuña sólida y la hueca no habrá ningún problema a la hora de ejecutar la simulación, pero si se ejecuta con estas piezas dará un error en el mallado. Esto viene propiciado porque se debe recordar que las paredes interiores de la estructura tienen un ancho de 0.75 mm, y por definición, la malla más fina con la que trabaja Simulation es de 4.41 mm.

Para llevar a cabo esta tarea, primero se accede al menú “Malla” y se selecciona la opción “Crear malla”.

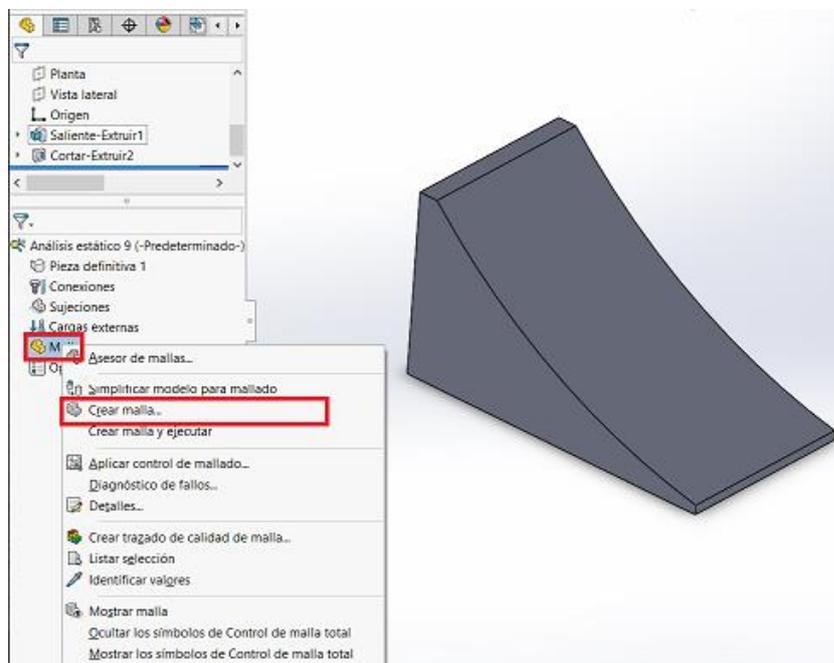


Figura III.39 Forma de proceder para asignar una malla al prototipo. Ubicación de la opción “crear malla” cuando se despliega el menú.

III. Desarrollo proyecto

Una vez que se ha abierto el menu de Mallado, se debe introducir el parámetro que se desea, en este caso una malla de 0.75 mm. Para ello se debe seleccionar la casilla situada junto a “Parámetros de mallado” e introducir este valor en la casilla remarcada en la figura siguiente, una vez tenemos el valor, se acepta y el software comenzará a realizar el mallado.

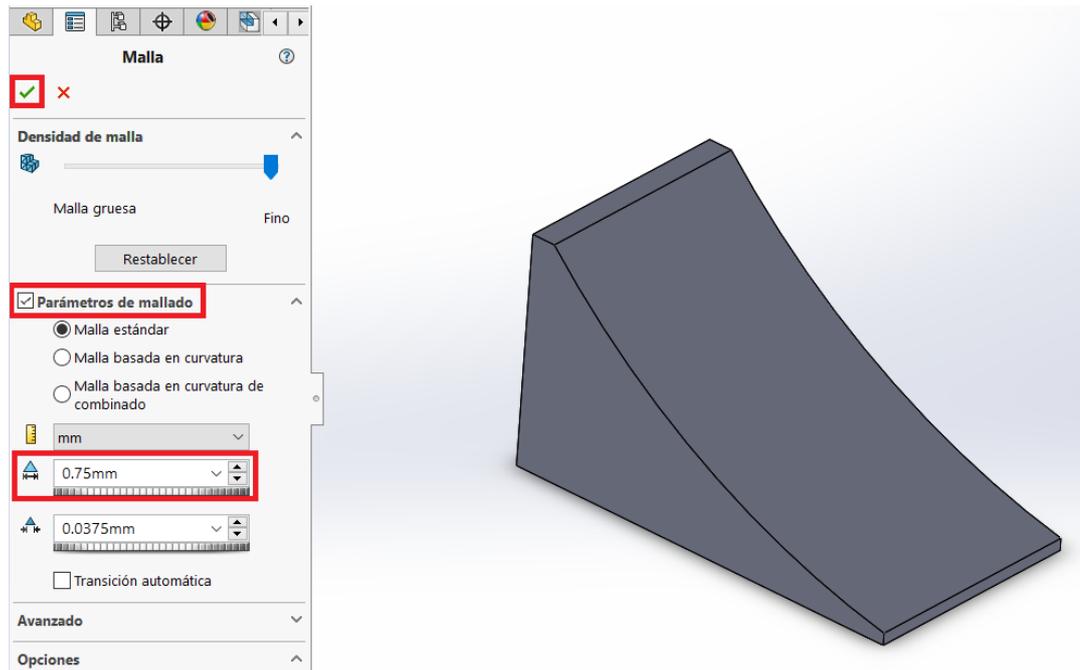


Figura III.40 Seleccionar la casilla donde acceder a los parámetros de mallado e introducir el tamaño requerido.

El proceso de mallado puede ocupar un gran periodo de tiempo, aumentando en proporción a lo preciso que se requiere que sea y a la complejidad de la estructura interna. Esto ha sucedido con uno de los prototipos, el trihexagonal, puesto que tiene una geometría interna más compleja que el de rejilla. El mallado con estos parámetros se logró ejecutar tras muchas horas de procesamiento, sin embargo, la cantidad de nodos, elementos y los 16 millones de grados de libertad que resultaron hicieron que no se pudiese simular con este prototipo y tener que descartarlo para futuros estudios, al menos, dentro de este trabajo, a expensas de conseguir equipos más capaces para seguir investigando.

III. Desarrollo proyecto

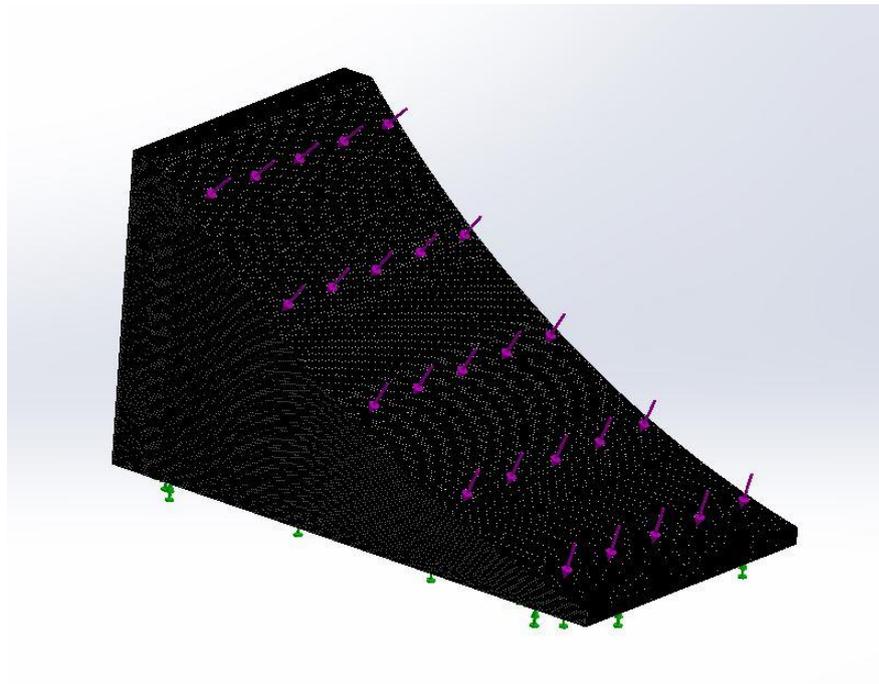


Figura III.41 Resultado tras el mallado del prototipo con patrón trihexagonal al 10%.

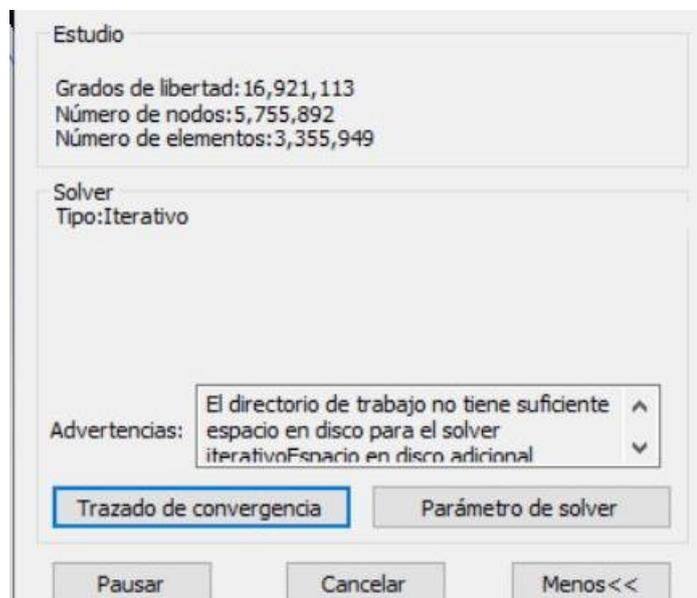


Figura III.42 Datos obtenidos tras el mallado, donde se puede apreciar el número nodos y de elementos, y los grados de libertad en el prototipo trihexagonal al 10%.

III. Desarrollo proyecto

III.6.2. Análisis de estados tensionales

Llegados a este punto, ya se puede determinar para cada uno de los casos a simular las condiciones necesarias para que el mediante el FEM se pueda resolver y obtener una aproximación precisa de cómo se comportará la pieza en la realidad. Como se ha ido comentando a lo largo del trabajo, no se pretende trabajar con una sola simulación, sino que se va a trabajar con múltiples simulaciones variando el material del prototipo y la fuerza que se ejerce sobre él. Esta fuerza dependerá de la inclinación de la pendiente y de la masa del vehículo, variables que también tomarán diferentes valores.

Se pretende realizar dos estudios comparativos, primeramente, se va a realizar un estudio sobre los tres prototipos de los que disponemos en esta fase del trabajo tras tener que descartar el trihexagonal por los motivos señalados anteriormente, por lo que podremos trabajar con el calzo sólido, el calzo hueco, y el calzo con patrón de rejilla al 10% de relleno. También disponemos de tres materiales para simular, el ABS y el PET incorporados en la biblioteca de SolidWorks, y el PLA, introducido como material personalizado. Por último, trabajaremos con 3 pendientes, que cuentan con una inclinación de 10°, 20° y 30°. En este primer estudio se podrá observar gráficamente como afectan las diferentes condiciones a los prototipos y se realizará un análisis de los resultados obtenidos referente a las tensiones, según el criterio de Von Mises, que permite relacionar el fallo elástico con la energía de distorsión elástica.

Tras realizar este primer estudio, se descartarán dos de los tres materiales, eligiéndose el que demuestre mejores condiciones, y se realizará un segundo estudio empleando este material y el prototipo de rejilla al 10%, ya que se considera que es el más interesante, y se realizarán múltiples simulaciones con diferentes cargas externas, que se calcularán para diferentes masas de vehículos y diferentes pendientes. Con este estudio se pretende determinar los límites útiles de este prototipo, y, por consiguiente, si se logra un resultado satisfactorio, podría sentar base para realizar estudios similares con todas las piezas que vayan a ser funcionales.

III. Desarrollo proyecto

III.6.2.1 Primer estudio

Para realizar este estudio, primero se debe determinar las variables con las que se va a trabajar. Como se ha comentado se trabajará con la masa de un Toyota Corolla, según datos del fabricante de 1160kg; con unas pendientes de 10°, 20° y 30°; también será necesario emplear el valor de β , calculado en el apartado correspondiente a estudio del estado tensional. Para realizar los cálculos se hará uso de una hoja de cálculo de Excel, donde se calculará F_x para cada una de las condiciones, y a partir de esta F_T , valor que será introducido como carga externa, en forma de fuerza distribuida, en las simulaciones. Se realizarán en total 27 simulaciones, puesto que se disponen de 3 prototipos, 3 materiales y 3 estados tensionales diferentes.

Primeramente, se muestra la tabla donde se realizan los primeros cálculos con las condiciones de estudio. Se destaca que para trabajar en Excel se debe convertir los grados en radianes, y para calcular las fuerzas se debe calcular el peso referente a la masa del vehículo.

Tabla III.1 Definición de condiciones de estudio.

Masa vehiculo	1160	kg
Peso vehículo	11379,600	N
β (grados)	34,375	°
β (radianes)	0,600	r
$\beta/2$ (grados)	17,188	°
$\beta/2$ (radianes)	0,300	r
	Grados (°)	Radianes
Pendiente 1	10	0,175
Pendiente 2	20	0,349
Pendiente 3	30	0,524

Tras disponer de esta información, se procede a calcular $F_{x,y}$ F_T , introduciendo este valor en cada una de las simulaciones, y rellenando con el valor obtenido de tensión de Von Mises las siguientes tres tablas, agrupando los resultados obtenidos para los diferentes materiales:

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.2 Datos para las simulaciones con ABS y resultados.

Simulación	Material	Prototipo	Pendiente (α)	F_x (N)	F_T (N)	Von Mises (MPa)
1	ABS	Cuña sólida	10	1976,05	6687,14	2,09
2		Cuña hueca				98,23
3		Rejilla al 10%				8,20
4		Cuña sólida	20	3892,05	13171,09	4,11
5		Cuña hueca				194,26
6		Rejilla al 10%				16,16
7		Cuña sólida	30	5689,80	19254,85	6,01
8		Cuña hueca				235,66
9		Rejilla al 10%				23,62

Tabla III.3 Datos para las simulaciones con PET y resultados.

Simulación	Material	Prototipo	Pendiente (α)	F_x (N)	F_T (N)	Von Mises (MPa)
1	PET	Cuña sólida	10	1976,05	6687,14	2,08
2		Cuña hueca				105,18
3		Rejilla al 10%				8,14
4		Cuña sólida	20	3892,05	13171,09	4,10
5		Cuña hueca				183,78
6		Rejilla al 10%				16,03
7		Cuña sólida	30	5689,80	19254,85	5,99
8		Cuña hueca				286,33
9		Rejilla al 10%				23,43

Tabla III.4 Datos para las simulaciones con PLA y resultados.

Simulación	Material	Prototipo	Pendiente (α)	F_x (N)	F_T (N)	Von Mises (MPa)
1	PLA	Cuña sólida	10	1976,05	6687,14	2,09
2		Cuña hueca				102,46
3		Rejilla al 10%				8,18
4		Cuña sólida	20	3892,05	13171,09	4,11
5		Cuña hueca				180,03
6		Rejilla al 10%				16,11
7		Cuña sólida	30	5689,80	19254,85	6,01
8		Cuña hueca				376,44
9		Rejilla al 10%				23,55

III. Desarrollo proyecto

Son varias las conclusiones que se pueden obtener tras este primer estudio. Se puede observar que los prototipos se comportan tal y como se esperaba, siendo el sólido el que obtiene menores tensiones de Von Mises, el hueco el que más, y con mucha diferencia y entre ellos se localiza el de patrón de rejilla, pero un primer dato significativo es que, pese a que solo tiene un 10% de material, las tensiones solo se multiplican por cuatro, por lo que se puede deducir que hay una mejoría en el prototipo, aunque habrá que estudiar si estas tensiones están por debajo de las de rotura. Sería también interesante en futuros estudios poder simular con otros porcentajes y ver como se comporta la resistencia mecánica con el aumento del porcentaje de relleno.

Mediante las siguientes tablas se podrá observar gráficamente las diferencias que se mencionan anteriormente. Para obtener resultados comparables, se ha utilizado un valor máximo para el gráfico común a todas las figuras. Este valor es concretamente 22,92 MPa. No es un valor escogido al azar, sino que proviene de una serie de cálculos. Se ha tomado de partida el límite de tracción del PET, que son 57.3 MPa, se ha multiplicado por un factor de seguridad del 80%, y el resultado se ha dividido entre 2 con el fin de apreciar mayores detalles.

Tabla III.5 Datos empleados para la obtención del valor máximo para las gráficas de las simulaciones realizadas.

Limite de tracción (Mpa)
57,3
Factor de seguridad
0,8
Limite con factor de seguridad
45,84
Valor empleado como máximo
22,92

III. Desarrollo proyecto

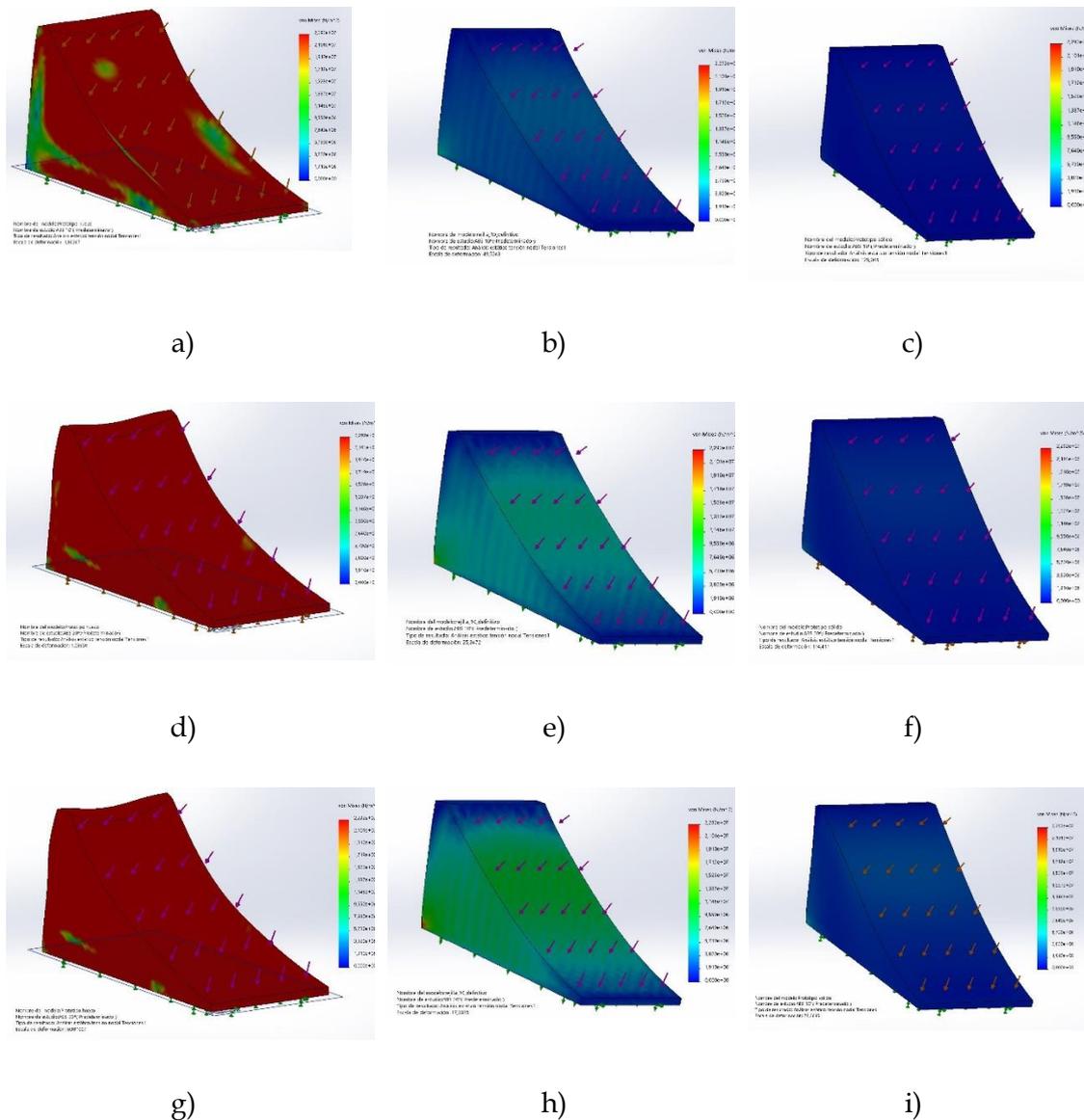


Figura III.43 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con ABS en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10° , b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10° , c) cuña sólida en una pendiente a 10° , d) cuña hueca en una pendiente a 20° , e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20° , f) cuña sólida en una pendiente a 20° , g) cuña hueca en una pendiente a 30° , h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30° , i) cuña sólida en una pendiente a 30° .

III. Desarrollo proyecto

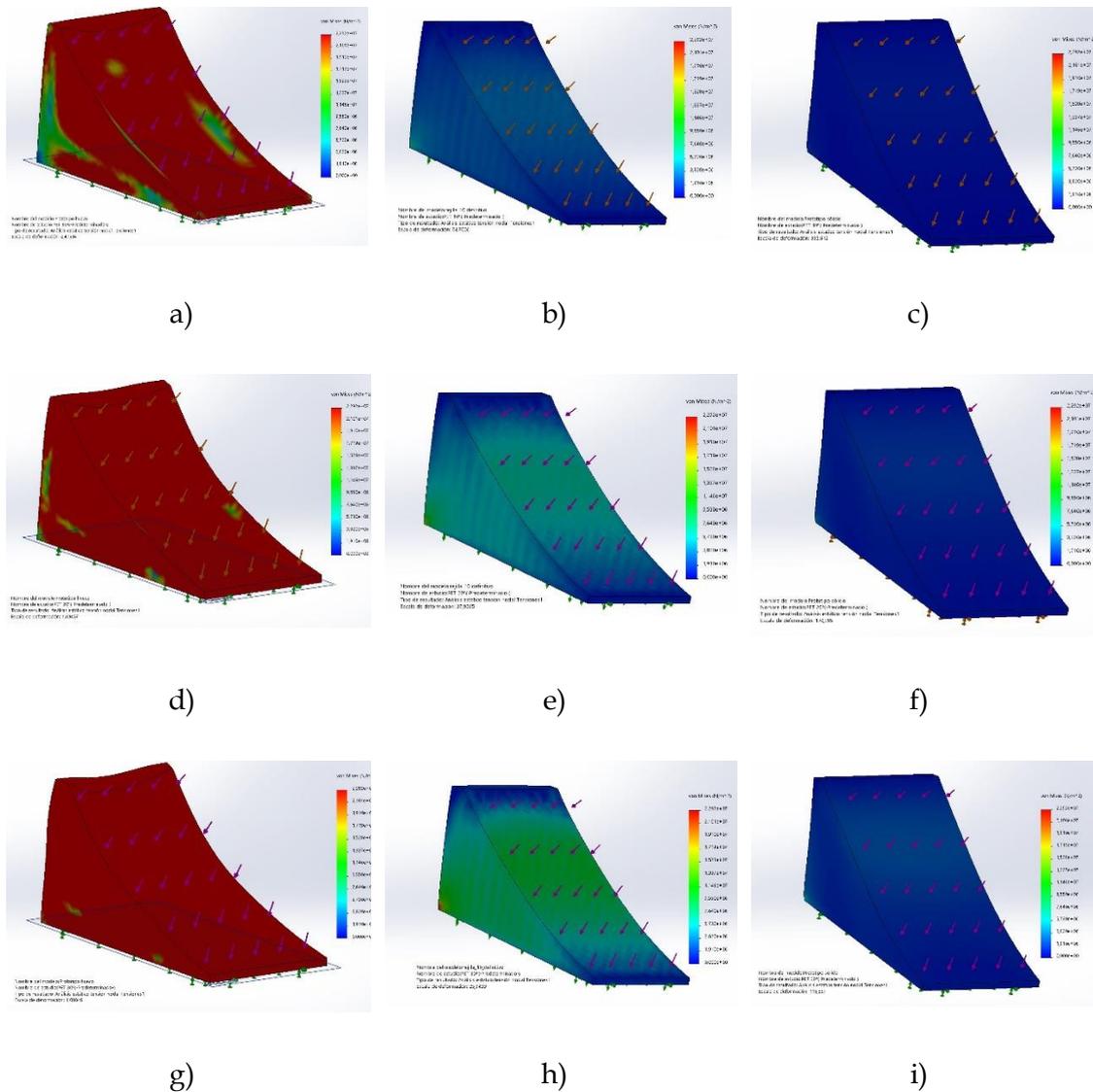


Figura III.44 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con PET en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10° , b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10° , c) cuña sólida en una pendiente a 10° , d) cuña hueca en una pendiente a 20° , e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20° , f) cuña sólida en una pendiente a 20° , g) cuña hueca en una pendiente a 30° , h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30° , i) cuña sólida en una pendiente a 30° .

III. Desarrollo proyecto

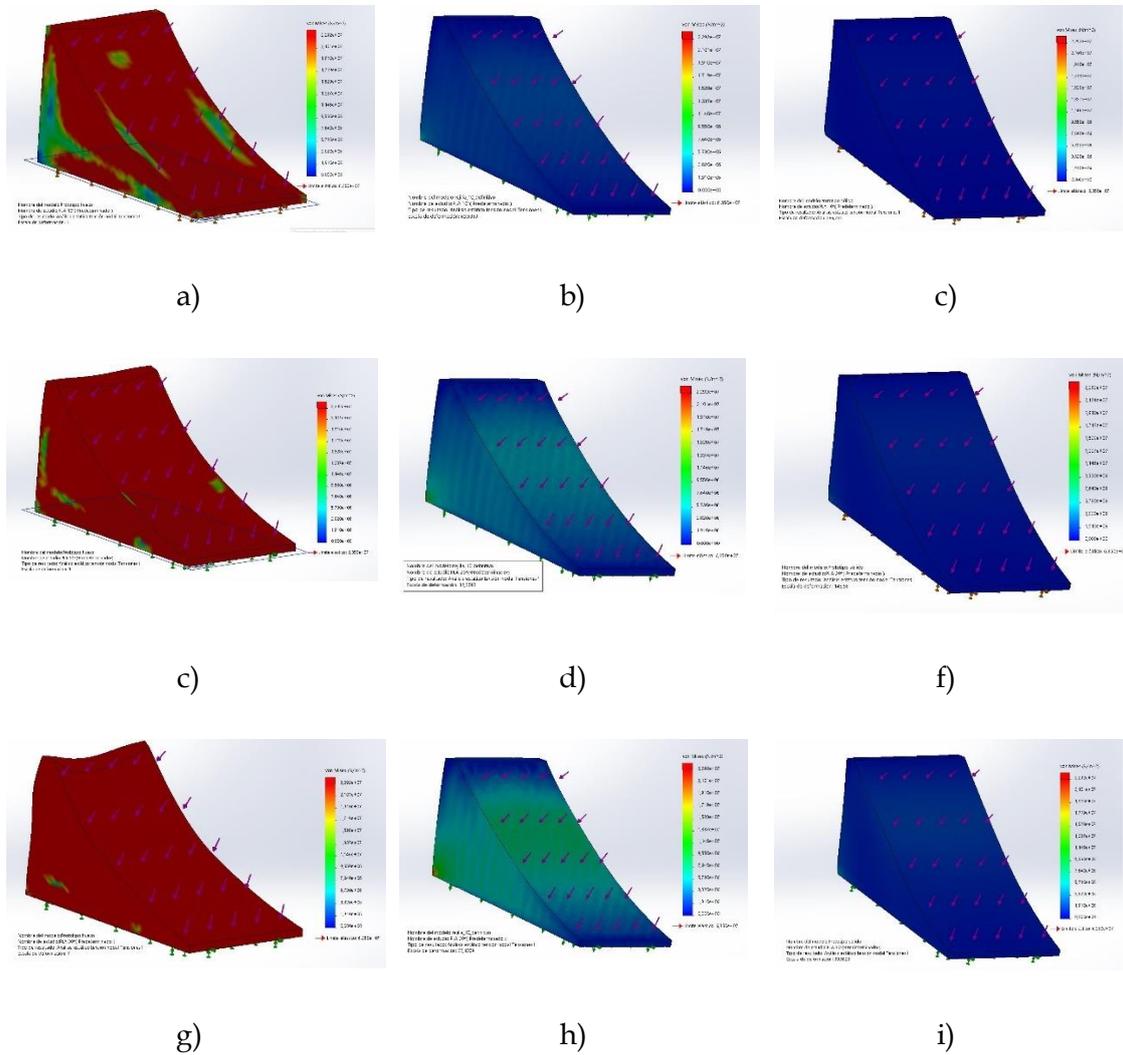


Figura III.45 Resultados gráficos obtenidos referentes a los ensayos con PLA en los diferentes prototipos, a) cuña hueca en una pendiente a 10° , b) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 10° , c) cuña sólida en una pendiente a 10° , d) cuña hueca en una pendiente a 20° , e) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 20° , f) cuña sólida en una pendiente a 20° , g) cuña hueca en una pendiente a 30° , h) cuña con patrón de rejilla en una pendiente a 30° , i) cuña sólida en una pendiente a 30° .

III. Desarrollo proyecto

Otra conclusión que se obtiene es que los diferentes polímeros cuentan con propiedades mecánicas similares, pues las variaciones entre las tensiones se encuentran en torno al 0.35%-0.40%. Realmente donde más diferencias se van a encontrar es en otras propiedades, como resistencia a una presión constante o a cambios de temperatura.

Como los resultados referentes a las tensiones de Von Mises son tan similares, se ha decidido realizar el siguiente estudio con PET, ya que en la mayoría de las simulaciones ha obtenido los mejores resultados, además, está considerado como un polímero respetuoso con el medioambiente, dado que es resistente al desgaste, a la rotura y al fuego; y no emite sustancias tóxicas que contaminen. Además, tiene una dificultad media para ser impreso.

III.6.2.1 Segundo estudio. Simulaciones con PET

Lo que se pretende conseguir con este estudio es detectar cuales serían los límites de uso del prototipo de rejilla al 10% impreso con PET. Para ello se van a realizar 25 simulaciones, con 25 cargas externas introducidas en el modelo FEM. Estas cargas se van a obtener mediante una combinación de pendientes, que oscilarán entre los 5° y los 30°, y de pesos de vehículos, provenientes de sus masas, que oscilarán entre 1000kg y 3000kg.

De nuevo, se empleará una hoja de cálculo Excel para obtener las diferentes F_x y F_T con las que se simulará, y también será útil para representar en un gráfico los resultados obtenidos.

En la siguiente tabla se pueden ver las variables que se han empleado para realizar los cálculos de la fuerza, se recuerda que los grados se deben convertir en radianes y las masas en pesos. Además, como en el estudio anterior, β permanece constante.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.6 Valores empleados para el cálculo de las fuerzas en las diferentes simulaciones.

	Grados (°)	Radianes r		Masa (kg)	Peso (N)
Pendiente 1	10	0,175	Vehículo 1	1000	9810
Pendiente 2	15	0,262	Vehículo 2	1500	14715
Pendiente 3	20	0,349	Vehículo 3	2000	19620
Pendiente 4	25	0,436	Vehículo 4	2500	24525
Pendiente 5	30	0,524	Vehículo 5	3000	29430

Tabla III.7 Valores calculados para F_x en cada una de las 25 situaciones.

		10	15	20	25	30
	F_x (N)	1000	1703,49	2539,01	3355,22	4145,89
	1500	2555,23	3808,52	5032,83	6218,83	7357,50
	2000	3406,98	5078,03	6710,44	8291,77	9810,00
	2500	4258,72	6347,54	8388,04	10364,71	12262,50
	3000	5110,47	7617,04	10065,65	12437,66	14715,00

Tabla III.8 Valores calculados para F_T en cada una de las 25 situaciones.

		10	15	20	25	30
	F_T (N)	1000	5764,77	8592,28	11354,39	14030,09
	1500	8647,16	12888,42	17031,58	21045,13	24898,51
	2000	11529,55	17184,55	22708,78	28060,17	33198,01
	2500	14411,94	21480,69	28385,97	35075,21	41497,51
	3000	17294,32	25776,83	34063,17	42090,26	49797,02

Una vez que se dispone de los 25 valores de F_T se procede a realizar las simulaciones, recogiendo los resultados de las tensiones máximas registradas en una nueva tabla.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.9 Valores extraídos de las simulaciones referentes a las tensiones máximas sufridas según el criterio de Von Mises.

		Pendientes (°)					Tensiones máximas (MPa)
		10	15	20	25	30	
Masas (kg)	1000	7,01	10,45	13,82	17,07	20,20	
	1500	10,52	15,68	20,72	25,61	30,30	
	2000	14,03	20,91	27,63	34,14	40,39	
	2500	17,54	26,14	34,54	42,68	50,49	
	3000	21,04	31,36	41,45	51,21	60,59	

Se recuerda que en propiedades del PET incluido en la biblioteca de SolidWorks podemos encontrar el valor del límite de tracción para el PET, establecido en 57,3 MPa, dato que podemos relacionar con las tensiones máximas sufridas. A este dato se ha decidido aplicarle un factor de seguridad del 80%, por lo que obtendremos un límite de tensiones con valor 45,84 MPa. Este dato será importante porque será el que empleemos para comparar los resultados obtenidos en las simulaciones. Se procederá a dividir los valores reflejados en la Tabla III.7 entre este valor. El resultado queda reflejado en la siguiente tabla.

Tabla III.10 Valores normalizados.

		Pendientes (°)				
		10	15	20	25	30
Masas (kg)	1000	0,15	0,23	0,30	0,37	0,44
	1500	0,23	0,34	0,45	0,56	0,66
	2000	0,31	0,46	0,60	0,74	0,88
	2500	0,38	0,57	0,75	0,93	1,10
	3000	0,46	0,68	0,90	1,12	1,32

III. Desarrollo proyecto

Esta tabla es muy significativa, puesto que indica que todo aquel valor que se sitúa por encima de la unidad supera la tensión que se ha tomado como máxima después de aplicar el factor de seguridad, por lo que habría que descartar su uso en esta situación. Estos resultados se aprecian mejor empleando un gráfico de superficie.

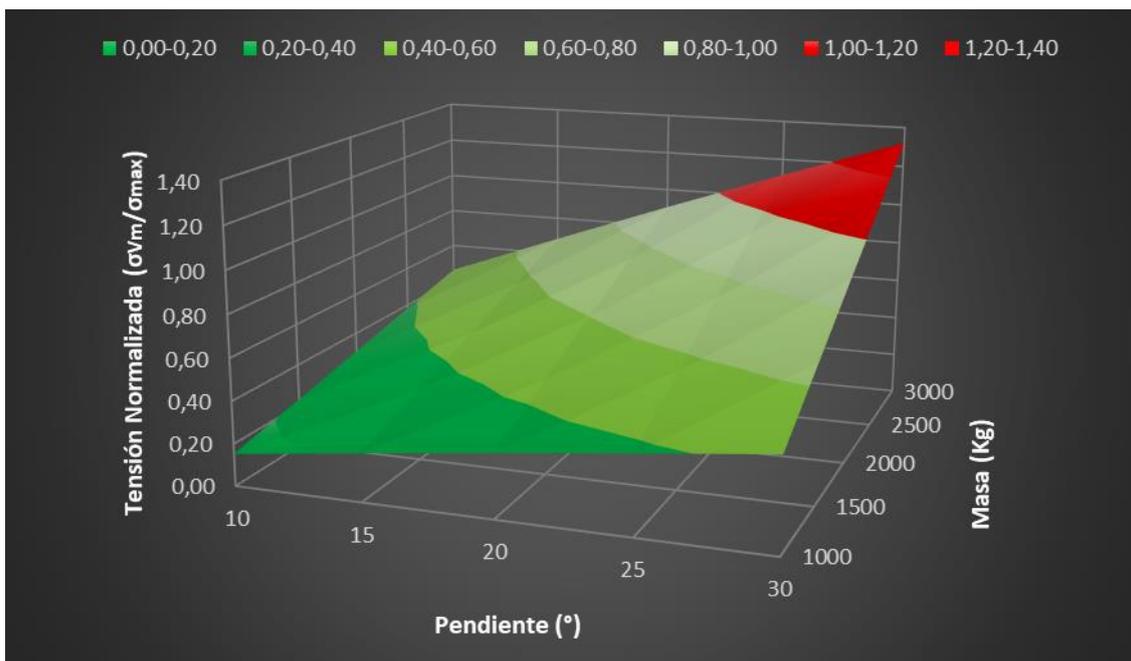


Figura III.46 Gráfico en 3D. Los prototipos que se encuentren dentro de la zona roja tendrán tensiones por encima de las máximas.

III. Desarrollo proyecto

III.6. PRESUPUESTO

En este apartado se pretende calcular el coste que va a tener el fabricar los prototipos para ensayar con ellos. Se pretende fabricar doce piezas en total, puesto que se disponen de cuatro prototipos diferentes y de tres materiales. El cálculo de los costes se hará empleando una hoja de Excel. Los datos para rellenar esta tabla se extraen del software laminador que se ha utilizado. Estos datos los ofrecen estos programas una vez que has introducido las condiciones de fabricación, informando al usuario del tiempo de fabricación, los metros necesarios de filamento y el peso final de la pieza.

Lo primero será pues preparar una tabla de Excel donde recoger la información del SLICER, esta tabla recogerá los tiempos de fabricación de cada prototipo, y el peso de la pieza una vez fabricada para los diferentes prototipos y materiales empleados.

Tabla III.11 Valores extraídos del software de slicer para la realización del presupuesto.

	Patrón de relleno	Tiempo	Metros de filamento (m)	Densidad (g/cm ³)	Masa (kg)	Coste (€/kg)	Total (€)
ABS	Sólido (100%)	2d8h10min	228,88	1,02	0,562	19,99 €	11,23 €
	Hueco (0%) paredes de 2 mm	10h38min	33,2	1,02	0,081	19,99 €	1,62 €
	Rejilla al 10%	15h32min	52,89	1,02	0,13	19,99 €	2,60 €
	Trihexagonal al 10%	15h48min	52,93	1,02	0,13	19,99 €	2,60 €
PLA	Sólido (100%)	2d8h16min	228,88	1,26	0,694	14,52 €	10,08 €
	Hueco (0%) paredes de 2 mm	10h38min	33,2	1,26	0,101	14,52 €	1,47 €
	Rejilla al 10%	15h32min	52,89	1,26	0,16	14,52 €	2,32 €
	Trihexagonal al 10%	15h48min	52,93	1,26	0,16	14,52 €	2,32 €
PET	Sólido (100%)	2d8h16min	228,88	1,42	0,782	22,36 €	17,49 €
	Hueco (0%) paredes de 2 mm	10h38min	33,2	1,42	0,113	22,36 €	2,53 €
	Rejilla al 10%	15h32min	52,89	1,42	0,181	22,36 €	4,05 €
	Trihexagonal al 10%	15h48min	52,93	1,42	0,181	22,36 €	4,05 €

De esta tabla lo que más interesará a la hora de realizar el presupuesto será el coste total de material de todas las piezas y la suma de todos los tiempos de fabricación, datos que se recogen en la siguiente tabla.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.12 Valores calculados de Coste Total de material y tiempo de impresión.

Coste Total
62,35 €
Tiempo Total
98h14min

Por otro lado, se ha creado una tabla con los diferentes costes que se van a tener, como es el precio de la luz, el coste de la impresora y su amortización, el porcentaje de piezas fallidas que se estima y el coste de mano de obra.

Tabla III.13 Diferentes costes directos e indirectos del proceso de fabricación.

Datos del modelo	
Coste luz [€/kWh]	0,15
Consumo medio [kW]	0,50
Coste por hora de luz [€/h]	0,075
Coste de impresora (€)	150
Tiempo amortización [años]	5
Días activa al año	250
Horas por día [h]	8
Coste de amortización [€/h]	0,015
Tasa de fallos	10%
Coste por hora del operador [€/h]	15
Tiempo preparación [h]	0,05
Tiempo postproducción [h]	0,05

Como ya se dispone del coste de la luz por hora, del coste de amortización por hora, del coste de operario por hora, la tasa de fallo, la cantidad total de horas y el coste del material, se procede al cálculo del coste total de la fabricación de los doce prototipos.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.14 Calculo del coste total de las piezas.

Coste de fabricacion de piezas impresas	
Coste piezas (€)	62,35
Tiempo impresión [h]	98
Coste material	
- Plástico	62,35 €
- Electricidad	7,35 €
Coste operario	
- Preparación	0,75 €
- Postproducción	0,75 €
Coste amortización	1,47 €
Coste fallos	7,27 €
Coste piezas	79,94 €

Por último, se adjunta un gráfico circular donde se puede ver como la mayoría del presupuesto se invierte en material (un 78%), siendo el coste de los fallos y el de material los siguiente más representativos (9%).

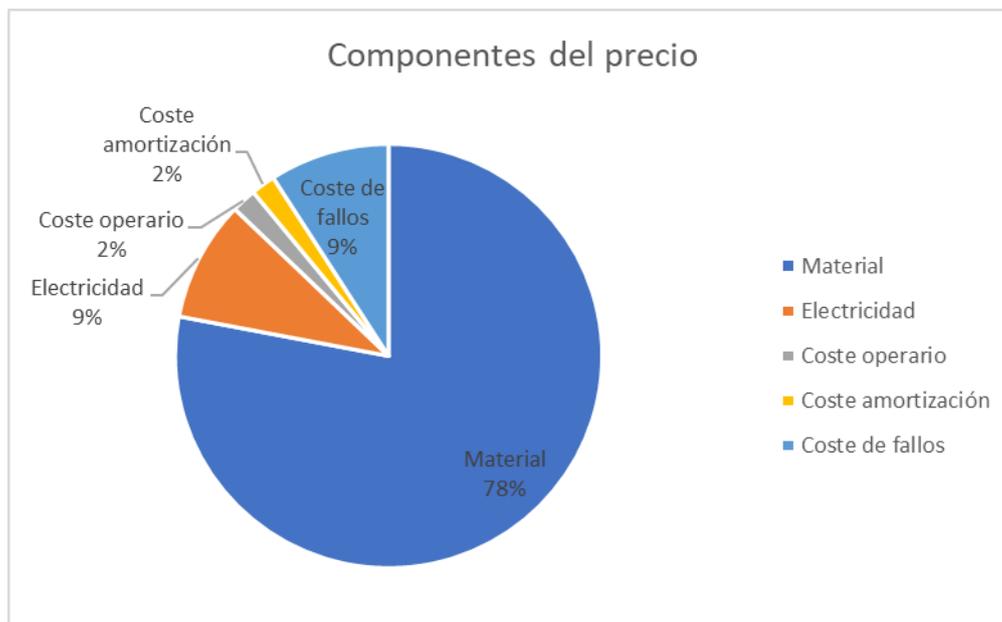


Figura III.47 Gráfico circular con los componentes del precio de fabricación.

III.7. CONCLUSIONES

La idea inicial de este trabajo era conseguir desarrollar un método con el que poder estudiar cualquier pieza fabricada mediante impresión 3D, siendo posible analizar su comportamiento mecánico según el patrón y el porcentaje de relleno elegidos. La base del método consistía en replicar la pieza en un programa de CAD y mediante una herramienta de simulación obtener resultados. Conforme se ha avanzado en el trabajo, se han ido detectando problemas con la idea inicial, como que piezas con un patrón demasiado complejo o un porcentaje de relleno demasiado alto pueden ser demasiado complejas para los simuladores de los que se disponen en la actualidad. Pese a esto, se ha podido demostrar que la metodología planteada es válida para el estudio con prototipos sencillos, siempre que el patrón y el porcentaje de relleno pueda ser soportado por el simulador.

También, se puede ver que originalmente es un método tedioso, que requiere muchas horas trasladando un patrón al software de CAD, y que ese patrón determinado, solo sería válido para un conjunto de piezas que compartan unas características similares, sin embargo, este método podría sentar la base para crear una biblioteca de patrones y porcentajes, donde el usuario seleccione la opción que desea y obtenga un bloque con el patrón solicitado, y mediante las herramientas de las que se dispone en SolidWorks recortarla con la forma de la pieza a estudiar, algo que apenas ocupa unos minutos de tiempo.

En cuanto a las conclusiones concretas de los prototipos ensayados, se ha podido ver como una pieza que cuenta con tan solo un 10% de material, es capaz de cumplir la misma función en casi todas las situaciones que una pieza rellena al 100%. El ahorro del 90% de material tiene beneficios tanto económicos como medioambientales, dado el problema que se sufre hoy en día con la contaminación de los polímeros. Sin embargo, no podemos hablar aún de ahorro de tiempo, puesto que hay métodos mucho más veloces para la fabricación de piezas con polímeros, pero no sería posible conseguir las estructuras internas que se crean mediante técnicas aditivas.

III. Desarrollo proyecto

Se ha podido ver como las características mecánicas de los principales polímeros empleados hoy en día en FDM son similares, y que las principales diferencias radican en su comportamiento frente a otros factores, como son la temperatura de entorno, las presiones constantes o los golpes e impactos.

En cuanto al prototipo de cuña diseñado con patrón de rejilla al 10% de relleno se ha podido determinar su validez en múltiples condiciones, que llevan a prácticamente poder generalizar su uso, dado que sería complicado localizar un vehículo de más de 3000kg situado en una pendiente de más de 30°. Realmente para considerar estas conclusiones como válidas científicamente, la única forma de hacerlo sería mediante la impresión de 25 prototipos y su estudio en un banco de ensayos bajo las 25 condiciones. Esto requeriría una gran cantidad de medios, tanto económicos como de tiempo. Empleando esta metodología, para este caso concreto, o cualquier otro, lo que se puede conseguir es reducir esos ensayos, seleccionando las condiciones más cercanas al límite de la resistencia del material. En este caso se podría estudiar el prototipo en las condiciones que superan 2500kg y 25° de pendiente y ver cómo se comporta. En conclusión, esta metodología podría ayudar a optimizar los ensayos sobre piezas funcionales impresas en 3D.

Otra opción que se deriva de este trabajo, es la posibilidad, de ampliar el número de simulaciones con otros patrones de impresión y porcentajes (siempre y cuando se vayan a poder simular con el software), y conformar una gráfica sobre los límites de tensión que resiste el prototipo en las diferentes condiciones, con el fin de que un usuario pueda buscar su situación personal, por ejemplo, un coche de 2000kg en una pendiente de 17°, y ver en el grafo con los resultados que cuñas con que patrón y con qué porcentaje de relleno cumplirían la función, porque, por ejemplo, en este caso, muchas de las situaciones se podrían haber cubierto con una cuña de rejilla al 5% ahorrando aún más material y tiempo. Aquí hay un campo para seguir trabajando, sería algo específico para este prototipo, pero que como todo es extrapolable a otros diseños de interés para los usuarios.

III. Desarrollo proyecto



Figura III.48 Imagen del prototipo impreso empleado para el desarrollo del trabajo.

**IV. BIBLIOGRAFÍA Y
WEBGRAFÍA**
**BIBLIOGRAFÍA
Y WEBGRAFÍA**

IV. Bibliografía y Webgrafía

Referencias

- (1). Obtenido de <http://dyor.roboticafacil.es/criterios-de-diseno-y-fabricacion-mediante-impresion-3d/>
- (2). Obtenido de <https://www.amazon.es/ZKKWLL-Engranaje-veh%C3%ADculos-automotores-Retirada/dp/B082SQDPHX>
- (3). Obtenido de <https://www.normadoc.com/spanish/din-76051-1-1992-11.html>
- (4). Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063724>
- (6). Obtenido de <https://www.elmercadoce.es/normativa-para-el-mercado-ce-de-impresoras-3d/>
- (7). <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f39bc87cf9a34fe8a07762e8b8086f0b&ckck=1>
- (8). Obtenido de <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/#:~:text=El%20PLA%20es%20en%20su,para%20otros%20productos%20no%20alimenticios.>
- (9). Obtenido de <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-1%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>
- (10). Obtenido de <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/>
- (11). <https://www.stratasys.com/materials/search?technologies=ff37d7b8297c4e43977c155d765f3305&sortIndex=0>
- (12). Obtenido de <https://www.campusplastics.com/>
- (13). Obtenido de <https://www.mastertec.es/blog/la-historia-de-la-impresion-quien-fue-su-inventor/#:~:text=Sin%20embargo%2C%20el%20aut%C3%A9ntico%20pionero,dise%C3%B1os%20de%20la%20primera%20impresora.>

IV. Bibliografía y Webgrafía

- (14). Obtenido de <https://abax3dtech.com/2020/07/24/historia-de-la-impresora-3d/>
- (15). Obtenido de <http://impresorad3d.com/impresoras-3d-historia/>
- (16). Obtenido de <https://www.stratasys.com/>
- (17). Obtenido de <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- (18). Obtenido de <https://www.3dmarket.mx/consejos-impresion/impresora-3d-amazon/>

V. APÉNDICES

APÉNDICES

V. Apéndices

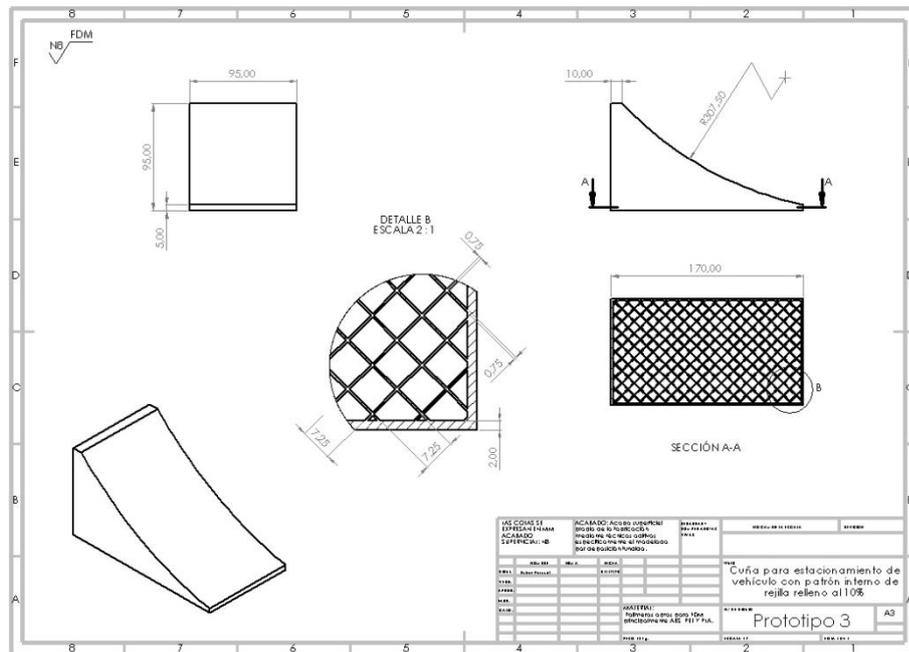


Figura IV.3 Plano de fabricación del prototipo con patrón de rejilla.

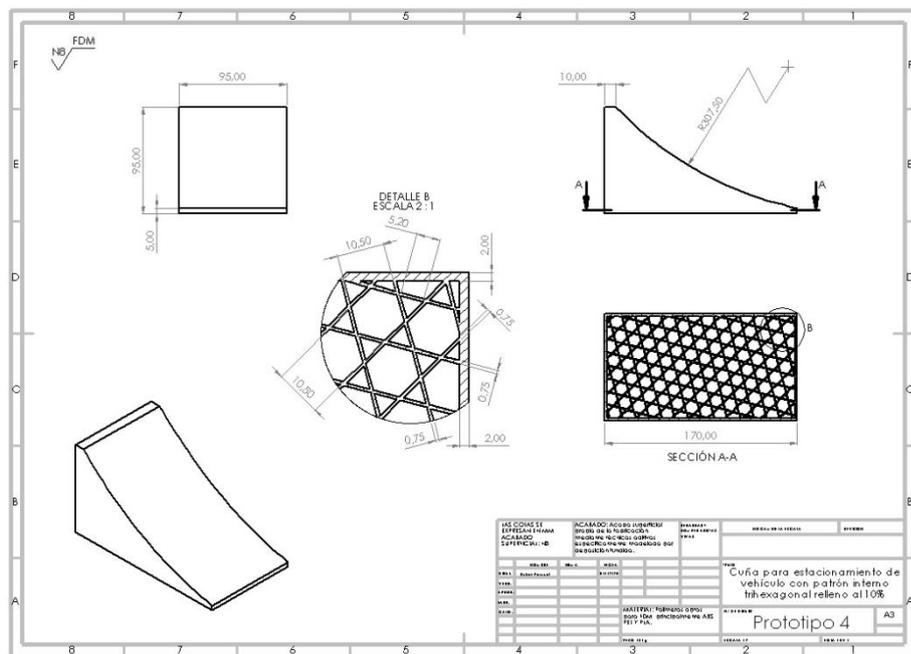


Figura IV.4 Plano de fabricación del prototipo con patrón trihexagonal.

V. Apéndices

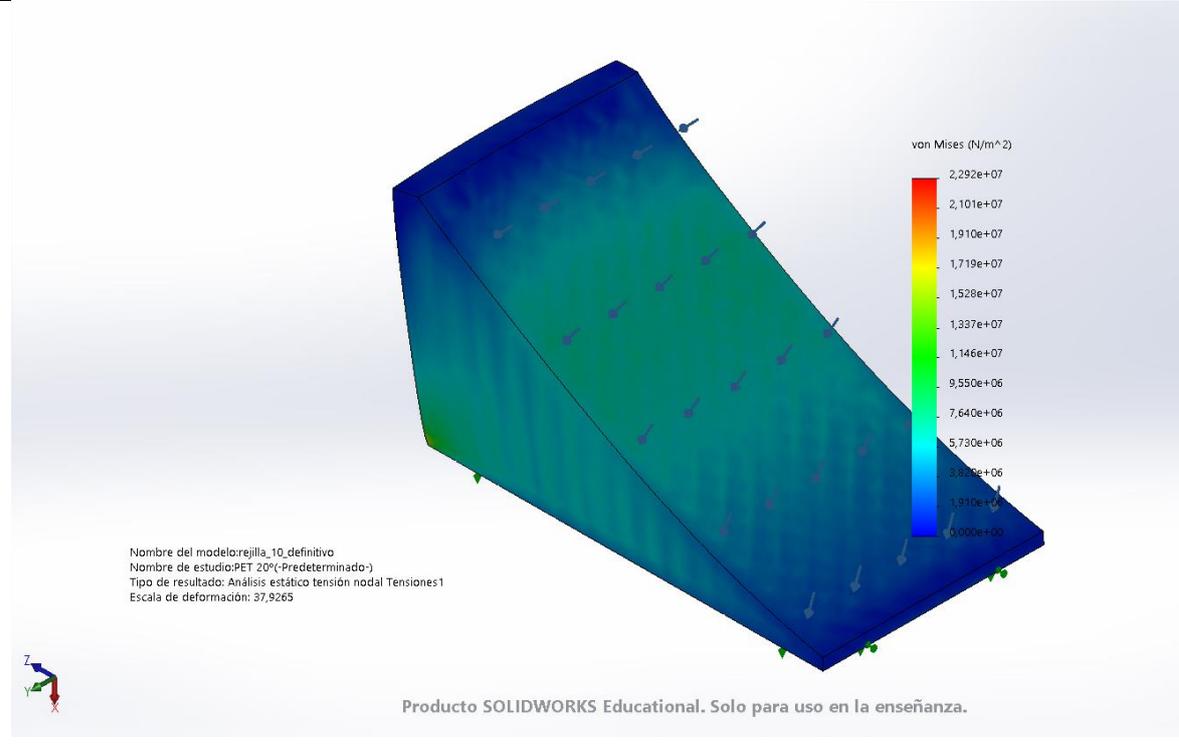
IV.2. INFORME DE SIMULACIÓN.

Se adjunta en el anexo un PDF con el informe generado por SolidWorks correspondiente a uno de los estudios que se ha realizado, en concreto la simulación del prototipo de rejilla al 10% fabricado en PET, con las condiciones de la masa prefijada y una inclinación de 20°.

Las tres siguientes tablas están extraídas del mencionado informe y contienen los resultados de esta simulación.

Tabla IV.1 Resultados del estudio de tensión.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	5,240e+04 N/m ²	1,603e+07 N/m ²
		Nodo: 86475	Nodo: 92191



Nombre del modelo: rejilla_10_definitivo
Nombre de estudio: PET 20° (-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 37,9265

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

V. Apéndices

Tabla IV.2 Resultados del estudio de desplazamientos.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00 mm Nodo: 505	4,754e-01 mm Nodo: 9261

Nombre del modelo: rejilla_10_definitivo
Nombre de estudio: PET 20° (-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 37,9265

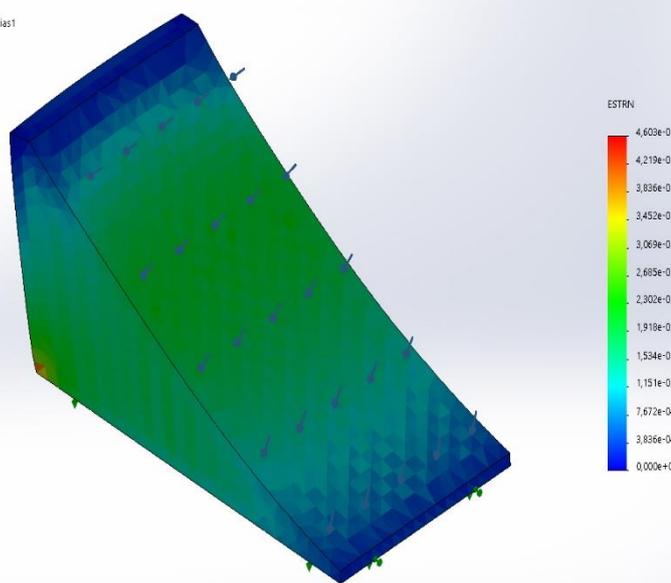
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

V. Apéndices

Tabla IV.3 Resultados del estudio de deformaciones.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3,084e-05 Elemento: 31119	4,603e-03 Elemento: 23187

Nombre del modelo: rejilla_10_definitivo
Nombre de estudio: PET_20%_Predeterminado
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 37,9265



ESTRN

4,603e-03
4,219e-03
3,836e-03
3,452e-03
3,069e-03
2,685e-03
2,302e-03
1,918e-03
1,534e-03
1,151e-03
7,672e-04
3,836e-04
0,000e+00

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.