

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

“Estudio técnico-económico para el desarrollo y  
fabricación de punteras de calzado de  
seguridad con materiales compuestos eco-  
eficientes”

**Autor:**

D. Andrés Rico Carbonell

**Dirigido por:**

Dra. Lourdes Sánchez Nácher

Dr. Juan Ivorra Martínez

**Julio, 2020**



# RESUMEN

## **“Estudio técnico-económico para el desarrollo y fabricación de punteras de calzado de seguridad con materiales compuestos eco-eficientes”**

El proyecto consiste en el estudio, cálculo y diseño de una puntera para calzado de seguridad para equipos de protección individual, fabricada con materiales eco-eficientes y biodegradables, sobre la cual se realizarán ensayos de resistencia al impacto y a la compresión según la normativa.

En el trabajo de fin de grado, se comprobarán varios tipos de materiales tanto usados en la actualidad como nuevas posibilidades eco-eficientes y biodegradables para poder contrastar sus propiedades y determinar si son las adecuadas. Para ello, se realizará un diseño en el programa SolidWorks según una puntera usada en la actualidad mediante la ingeniería inversa y seguidamente se simularán los ensayos.

Finalmente, se realizará el estudio económico con el fin de comprobar la viabilidad del proyecto en función del material seleccionado.



# **SUMMARY**

**“Technical-economic study for the development and manufacturing of a safety toe caps with eco-efficient composite materials”**

This project consists in the study, calculus and design of a safety toe cap for safety shoes for individual protection equipment, made of eco-efficient and biodegradable materials, about which will be made resistance impact tests and compression tests considering the normative.

In the Final Project, various types of materials used nowadays and new eco-efficient and biodegradable possibilities will be checked in order to contrast their properties and decide if they are suitable. For it, a design will be made in SolidWorks using reverse engineering to get the shape of the toe cap and then, the simulations will be made.

Finally, an economic study will be made in order to prove the viability of the project depending on the selected material.



# RESUM

## **“Estudi tècnic-econòmic per al desenvolupament i fabricació de punteres per a calçat de seguretat amb materials eco-eficients”**

El projecte consisteix en el estudi, càlcul i disseny de una puntera per a calçat de seguretat per a equips de protecció individual, fabricada amb materials eco-eficients y biodegradables, sobre la que es realitzaran assajos de resistència al impacte i a la compressió segons la normativa.

Al treball de Final de Grau, es comprovaran diversos tipus de materials tant usats en la actualitat com noves possibilitats eco-eficients i biodegradables per a poder contrastar les seues propietats i determinar si son les adequades. Per això, es realitzarà un disseny amb el programa SolidWorks segons una puntera utilitzada en la actualitat mitjançant la enginyeria inversa i seguidament es simularan els assajos.

Finalment, es realitzarà el estudi econòmic amb el fi de comprovar la viabilitat del projecte en funció del material utilitzat.





# TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	3
SUMMARY.....	5
RESUM .....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS.....	17
LISTADO DE TABLAS .....	21
<b>I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>23</b>
I.1 ANTECEDENTES .....	25
I.2 ESTUDIO DE MERCADO .....	28
I.2.1 Condiciones de trabajo de las punteras actuales .....	28
I.2.2 Tipos de punteras.....	28
I.2.2.1 Punteras de acero al carbono .....	28
I.2.2.2 Punteras de aluminio inyectado endurecidas por precipitación .....	30
I.2.2.3 Punteras de material compuesto.....	33
I.3 MATERIALES UTILIZADOS.....	36
I.3.1 Acero fino al carbono F-115 .....	36
I.3.2 Aluminio inyectado endurecido por precipitación.....	37
I.3.3 Materiales compuestos .....	38
I.3.3.1 Clasificación de los compuestos .....	39
I.3.3.2 Matrices poliméricas.....	40
I.3.3.3 Elementos de refuerzo .....	42
I.3.4 Tendencia del mercado y nuevas propuestas .....	49
I.3.4.1 Materiales de origen BIO y/o biodegradables .....	50

I.3.4.2	Fibras naturales .....	54
<b>II</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>57</b>
II.1	OBJETIVO GENERAL .....	59
II.2	OBJETIVOS PARTICULARES.....	59
<b>III</b>	<b>DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b>	<b>61</b>
III.1	DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS .....	63
III.2	NORMATIVA APLICABLE .....	69
III.3	ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES .....	71
III.4	SELECCIÓN DE MATERIALES .....	78
III.4.1	Acero al carbono F-115 norma UNE .....	78
III.4.2	Aluminio 3.4370 norma DIN 1725.....	79
III.4.3	Resina Epoxy RESOLTECH 1070 ECO 37% contenido Bio .....	79
III.4.4	Bio Poliamida 10-10 NP DU 102 de NaturePlast.....	80
III.4.5	Ácido Poliláctico .....	81
III.4.6	Fibras de refuerzo.....	81
III.4.7	Cálculo de las propiedades de los materiales compuestos.....	82
III.5	SIMULACIÓN MEDIANTE FEM.....	87
III.5.1	Modelo FEM proyecto .....	87
III.5.1.1	Aplicación del modelo de plasticidad Von Mises .....	89
III.5.1.2	Aplicación de materiales .....	91
III.5.2	Análisis de estados tensionales y deformaciones .....	96
III.5.2.1	Ensayo a compresión.....	99
III.5.2.2	Ensayo a impacto .....	102
III.5.2.3	Resultados de los ensayos.....	105
III.5.3	Trazado de Factor de Seguridad .....	106

III.6	DISEÑO FINAL .....	108
III.7	FABRICACIÓN.....	109
III.8	ESTUDIO ECONÓMICO .....	111
<b>IV</b>	<b>APÉNDICES .....</b>	<b>117</b>
IV.1	REFERENCIAS .....	119
IV.2	LISTADOS DE NORMAS UTILIZADAS.....	122
IV.3	PLANOS Y ESQUEMAS TÉCNICOS .....	123



# ABREVIATURAS

$\nu_F$	Coefficiente de Poisson de la fibra
$\nu_M$	Coefficiente de Poisson de la matriz
$\nu_{XY}$	Coefficiente de Poisson en la dirección XY
$\nu_{XZ}$	Coefficiente de Poisson en la dirección XZ
$\nu_{YZ}$	Coefficiente de Poisson en la dirección YZ
CF	Fibra de carbono
$E_F$	Módulo elástico de la fibra
$E_L$	Módulo elástico longitudinal
$E_M$	Módulo elástico de la matriz
EP	Resina epoxi
$E_T$	Módulo elástico transversal
$E_x$	Módulo elástico en la dirección de las x
$E_y$	Módulo elástico en la dirección de las y
$E_z$	Módulo elástico en dirección de las z
FEM	Método de los elementos finitos
FN	Beneficio neto
$F_s$	Factor de seguridad
GF	Fibra de vidrio
$G_{XY}$	Módulo de cortadura en la dirección XY

$G_{XZ}$	Módulo de cortadura en la dirección XZ
$G_{YZ}$	Módulo de cortadura en la dirección YZ
$I_0$	Inversión inicial
$i$	Tasa de interés
$L$	Longitud de la fibra corta
$n$	Periodo de tiempo
PA	Poliamida
PLA	Acido poliláctico
PMEK	Peróxido de metil etil cetona
$r$	Radio de la fibra
RTM	Moldeo por transferencia de resina
$S_{XY}$	Tensión de rotura a cortadura en la dirección XY
TIR	Tasa interna de retorno
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene
UP	Resina de poliéster insaturado
$V_f$	Volumen de fibra
VAN	Valor actual neto
$X_C$	Límite a la compresión en la dirección de las X
$X_T$	Límite a la tracción en la dirección de las X
$Y_C$	Límite a la compresión en la dirección de las Y
$Y_T$	Límite a la tracción en la dirección de las Y

$\eta$	Parámetro de retraso en el corte
$\rho$	Densidad





# LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura I.1</b> Zuecos fabricados en madera con un corte de cuero animal para prevenir cortes y pequeños impactos. ....	25
<b>Figura I.2</b> Imágenes de calzados de seguridad para equipos de protección individual. (a) Ubicación de las punteras de protección en el calzado actual. (b) Ejemplo de botas de seguridad con incorporación de punteras de seguridad <sup>4</sup> .....	27
<b>Figura I.3</b> Diseño de puntera de acero al carbono utilizadas en la actualidad <sup>5</sup> . ....	29
<b>Figura I.4</b> Procesos de transformación mecánica del laminado circular. (1) Doblado de la base de la puntera. (2) Estirado de la chapa mediante prensa hidráulica para conseguir la forma curva de la puntera <sup>6</sup> . ....	30
<b>Figura I.5</b> Diseño de puntera de aluminio inyectado endurecidas por precipitación <sup>4</sup> . 31	
<b>Figura I.6</b> Proceso de inyección de aluminio. (1) Colada de aluminio fundido. (2) Plato fijo del molde. (3) Plato móvil del molde. (4) Expulsores de pieza. (5) Cavidades. (6) Husillo <sup>6</sup> . ....	32
<b>Figura I.7</b> Puntera de material compuesto con matriz de resina de poliéster y refuerzo de fibra de vidrio. ....	34
<b>Figura I.8</b> Proceso de fabricación de punteras de protección para calzado de seguridad realizadas por moldeo por transferencia de resina (RTM). (1) Bombeo de resina y endurecedor al molde. (2) Expulsores. (3) Cámara de mezcla y transferencia. (4) Molde con la forma de la pieza. ....	35
<b>Figura I.9</b> Monómero de resina base de poliéster insaturado. ....	41
<b>Figura I.10</b> Monómero de resina epoxídica. ....	42
<b>Figura I.11</b> Interacción entre matriz y fibra mediante fenómenos de adhesión. a) Interacción mecánica. b) Interacción química. ....	43
<b>Figura I.12</b> Refuerzos tipo fibra cortada y tipo MAT. ....	44
<b>Figura I.13</b> Fibra larga unidireccional de carbono. ....	44
<b>Figura I.14</b> Tejido biaxial de fibra de aramida. ....	45

<b>Figura I.15</b> Tejido triaxial de fibra de carbono.....	45
<b>Figura I.16</b> Producción, estirado y tejido de fibras de vidrio <sup>13</sup> .....	46
<b>Figura I.17</b> Estructura de la fibra de vidrio. ....	47
<b>Figura I.18</b> Esquema de los procesos de obtención de fibra de carbono a partir de las fibras de poliacrilonitrilo.....	48
<b>Figura I.19</b> Estructura grafénica de las fibras de carbono. ....	49
<b>Figura I.20</b> Análisis del ciclo de vida para evaluar el impacto medio ambiental. ....	50
<b>Figura I.21</b> Síntesis de bioPA a partir de aceite de ricino. (a) Aceite ricinoleico. (b) Heptanal. (c) Carbonatoéster. (d) Monómero de bioPA.....	52
<b>Figura I.22</b> Monómero de ácido poliláctico.....	53
<b>Figura I.23</b> Tejido de fibra de lino.....	55
<b>Figura I.24</b> Tejido de fibra de basalto.....	56
<b>Figura III.1</b> Dibujado de la planta de la puntera. Unidades en milímetros.....	63
<b>Figura III.2</b> Dibujado del alzado de la puntera. Unidades en milímetros.....	64
<b>Figura III.3</b> Dibujado del perfil de la puntera.....	64
<b>Figura III.4</b> Operación de barrido de superficie.....	65
<b>Figura III.5</b> Operación rellenar superficie.....	66
<b>Figura III.6</b> Operación de redondeo entre ambas superficies curvas.....	67
<b>Figura III.7</b> Diseño final del prototipo de la puntera de seguridad para calzado de seguridad realizado con la herramienta SolidWorks.....	68
<b>Figura III.8</b> Ensayo a compresión de una puntera de seguridad. 1) Plato superior móvil. 2) Puntera de seguridad. 3) Cilindro de pasta modular para indicar si se cumple la luz libre mínima. 4) Plato inferior fijo o plato de apoyo. ....	70
<b>Figura III.9</b> Esquema del percutor utilizado en ensayos de impacto para punteras. ....	71
<b>Figura III.10</b> Croquis para la proyección de la zona de aplicación de la fuerza.....	72
<b>Figura III.11</b> Creación de la zona de aplicación de fuerzas a partir de la proyección del croquis.....	73

<b>Figura III.12</b> Operación dar espesor, para un espesor de 3mm. ....	74
<b>Figura III.13</b> Restricciones aplicadas sobre la base de la puntera simulando el contacto con el suelo. ....	74
<b>Figura III.14</b> Aplicación de fuerza de compresión sobre la cara superior de la puntera. ....	75
<b>Figura III.15</b> Aplicación de fuerza de impacto sobre la superficie de impacto del percutor sobre la puntera. ....	77
<b>Figura III.16</b> Aplicación del tiempo de realización de ensayo. ....	87
<b>Figura III.17</b> Aplicación de la fuerza de forma lineal en función del tiempo establecido. ....	88
<b>Figura III.18</b> Modelos de cálculo FEM en SolidWorks frente al comportamiento de los materiales. (a) Gráfica tensión-deformación del comportamiento de los materiales en la realidad. (b) Modelo de cálculo isotrópico en SolidWorks. (c) Modelo de cálculo de plasticidad Von Mises en Solid Works.....	90
<b>Figura III.19</b> Introducción de las propiedades resistentes y elásticas de los laminados calculados por el modelo micromecánico de Chamis en el software de cálculo eLamx 2.0. ....	91
<b>Figura III.20</b> Creación de laminado EP+CF 60% siguiendo la siguiente orientación [0, 45, 90, -45]s. ....	92
<b>Figura III.21</b> Obtención de las propiedades mecánicas de los laminados a partir del material introducido, orientación y espesor.....	92
<b>Figura III.22</b> Gráfico polar del laminado compuesto por EP+CF 60%.....	93
<b>Figura III.23</b> Matriz [ABBD] del laminado EP+CF 60% .....	95
<b>Figura III.24</b> Introducción y creación del laminado EP+Basalto 60% a partir de sus propiedades mecánicas y utilizando para el cálculo el modelo de Plasticidad de Von Mises. ....	96
<b>Figura III.25</b> Creación de análisis estático no lineal para la realización de un cálculo mediante modelo FEM. ....	97
<b>Figura III.26</b> Selección de material para el estudio no lineal estático del modelo FEM.	98

<b>Figura III.27</b> Mallado de la pieza para el ensayo a compresión con una densidad de malla muy fina para la realización del cálculo.....	99
<b>Figura III.28</b> Selección del tipo de resultados en el ensayo a compresión a partir de las condiciones determinadas para el estudio de una puntera de seguridad fabricada con PLA+Basalto 60%.....	100
<b>Figura III.29</b> Estados tensionales en la puntera de seguridad para un espesor de 3mm y PLA+Basalto 60% utilizado como material.....	101
<b>Figura III.30</b> Desplazamientos obtenidos en la realización del ensayo a compresión utilizando PLA+Basalto 60% como material.....	101
<b>Figura III.31</b> Deformaciones unitarias obtenidas en el ensayo de compresión utilizando PLA+Basalto 60% como material.....	102
<b>Figura III.32</b> Representación de los estados tensionales en el ensayo de impacto para puntera fabricada en PLA+Basalto 60%.....	103
<b>Figura III.33</b> Desplazamientos resultantes del ensayo a impacto utilizando PLA+Basalto 60% como material.....	103
<b>Figura III.34</b> Deformaciones unitarias tras el ensayo a impacto utilizando PLA+Basalto 60% como material.....	104
<b>Figura III.35</b> Expresión para el cálculo del VAN.....	113
<b>Figura III.36</b> Expresión para el cálculo del TIR.....	114

# LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla I.1</b> Propiedades mecánicas del acero F115 recocido y estirado en frío.....	37
<b>Tabla I.2</b> Propiedades mecánicas de la aleación aluminio 3.4370 obtenidas en Thyssen Krupp Materials Ibérica.....	38
<b>Tabla I.3</b> Propiedades mecánicas de la bioPA 10-10 <sup>20</sup> . ....	52
<b>Tabla I.4</b> Propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA).....	53
<b>Tabla I.5</b> Propiedades mecánicas resina epoxy RESOLTECH 1070 de Castro Composites. ....	54
<b>Tabla III.1</b> Luz vertical libre mínima entre la cara interna del tope superior y la base de la pieza. ....	69
<b>Tabla III.2</b> Tabla de propiedades mecánicas del acero al carbono F-115.....	78
<b>Tabla III.3</b> Propiedades mecánicas del Aluminio 3.4370 norma DIN 1725.....	79
<b>Tabla III.4</b> Propiedades mecánicas de la resina epoxy RESOLTECH 1070 para el estudio de un material compuesto tomando ésta como matriz.....	80
<b>Tabla III.5</b> Propiedades mecánicas poliamida 10-10 NP DU 102 de Nature Plast.....	80
<b>Tabla III.6</b> Tabla de propiedades resistentes y elásticas del PLA INGEO biopolymer 2003D.....	81
<b>Tabla III.7</b> Propiedades resistentes y elásticas medias de las fibras de carbono de alto módulo, fibras de vidrio, fibras de lino, fibras de yute y fibras de basalto.....	82
<b>Tabla III.8</b> Propiedades elásticas calculadas con el modelo micromecánico de Chamis de las combinaciones resina epoxy con fibras de refuerzo en formato tejido unidireccional. ....	84
<b>Tabla III.9</b> Propiedades resistentes calculadas con el modelo micromecánico de Chamis de las combinaciones resina epoxy con fibras de refuerzo en formato tejido unidireccional. ....	85
<b>Tabla III.10</b> Propiedades mecánicas calculadas con el modelo micromecánico de retraso en el corte de Cox de las combinaciones resina bioPA o PLA con fibras de refuerzo en formato tejido fibra corta.....	86

<b>Tabla III.11</b> Resultados de las propiedades mecánicas de los laminados obtenidos en eLamx2.....	95
<b>Tabla III.12</b> Tabla del cálculo tensiones-desplazamientos realizados en el ensayo de compresión e impacto para todos los materiales propuestos. ....	105
<b>Tabla III.13</b> Tabla del trazado del factor de seguridad frente al límite elástico y a la rotura.....	107
<b>Tabla III.14</b> Presupuesto de la inversión inicial para la realización del proyecto.....	111
<b>Tabla III.15</b> Tabla de beneficios anuales en función del coste de venta y del volumen de producción.....	112
<b>Tabla III.16</b> Tabla de costes anuales aproximados de materia prima, mano de obra, equipamiento y costes de producción.....	113
<b>Tabla III.17</b> Tabla para el cálculo del VAN y TIR para poder estudiar la rentabilidad del proyecto a partir del beneficio neto anual. ....	115

# **I INTRODUCCIÓN**





### I.1 ANTECEDENTES

En el siguiente proyecto de final de grado se estudiarán los cálculos y el diseño para realizar una puntera de material compuesto con materiales eco-eficientes para equipos de protección individual, concretamente calzado de seguridad. Para ello, se debe indagar en los orígenes de estos <sup>1</sup>.

La historia de las punteras para el calzado de seguridad se remonta a los tiempos de la invención y aplicación de las normas de seguridad y protección de riesgos laborales del trabajador. A mediados del siglo XIX, la necesidad de protección individual aumentó en gran medida debido al creciente movimiento industrial de la era de la máquina. Al principio, estas necesidades de protección no fueron cubiertas puesto que no existía ningún tipo de legislación que garantizase la seguridad del trabajador, el cual veía afectadas cada vez más sus condiciones de trabajo a medida que pasaba el tiempo. Por aquel entonces, las empresas justificaban que era más económico sustituir un trabajador lesionado por uno sano que prevenir sus propios riesgos <sup>2</sup>.

Anteriormente, el calzado utilizado para prevenir las lesiones laborales no eran más que zuecos de madera o botas de cuero como se aprecia en la **Figura I.1**. A pesar de ello, dicho diseño no fue el adecuado para evitar los nuevos riesgos laborales a los cuales estaban expuestos en el nuevo entorno de la industria.



**Figura I.1** Zuecos fabricados en madera con un corte de cuero animal para prevenir cortes y pequeños impactos.

# I. Introducción

---

En 1833, el Reino Unido tras la implementación de la “Ley de Fabricas” empezó a controlar e inspeccionar fabricas industriales de forma gubernamental con el fin de mejorar las condiciones de trabajo, especialmente las del trabajo de los niños. Por consiguiente, en 1850 fue cuando los trabajadores realmente comenzaron a tener mejoras en sus condiciones de trabajo debido a las actualizaciones de dicha ley. Seguidamente, en 1867 la ley fue extendida de manera que se incluía una mayor protección frente accidentes, enfermedades y se determinaban estandarizaciones para evitar posibles accidentes de trabajo. En 1897, la inspección médica se incorporó al aplicarse las “Leyes de Compensación”<sup>3</sup>.

En el caso de España, en el año 1873 fue Eduardo Benot Rodríguez quien, tras comprobar que el 52,5% de trabajadores eran niños, propuso la “Ley Benot” la cual se encargaba de brindar las primeras normas de seguridad a los trabajadores. En 1900, es cuando se aprueba la “Ley de Accidentes de Trabajo”, esto provocó que las empresas adoptaran la responsabilidad de sus trabajadores, y por tanto que contrataran seguros con la finalidad de cubrir las posibles indemnizaciones de éstos.

De esta forma, cuando finalizó la “Segunda Guerra Mundial”, los costes de los accidentes de trabajo se dispararon. Por ello, se necesitaba proponer nuevas soluciones para disminuir los riesgos laborales, siendo una de estas, las botas de seguridad.

Las primeras botas de seguridad fueron fabricadas en Alemania y seguidamente su eficacia provocó que se extendiesen a muchos otros países. En un principio, estaban destinadas a los trabajadores industriales, pero no pasó mucho tiempo hasta que se incorporaron en el día a día de los civiles y militares. Estos diseños eran realizados con puntas de acero y además de ser incómodos y poco estéticos, presentaban una baja durabilidad.

Por consiguiente, en las últimas décadas el zapato de seguridad ha ido evolucionando hasta alcanzar los estándares de confort que el usuario necesita además de garantizar una protección y durabilidad con alta fiabilidad. Un ejemplo de éstos se aprecia en la **Figura I.2**. En la actualidad, se sigue mejorando en el mundo del calzado de seguridad, de modo que se estudian distintos tipos de materiales para las punteras

# I. Introducción

---

de protección, propiedades antiadherentes y antiestáticas, protección frente a la perforación, ergonomía, estética y adaptabilidad al usuario.



(a)



(b)

**Figura I.2** Imágenes de calzados de seguridad para equipos de protección individual. (a) Ubicación de las punteras de protección en el calzado actual. (b) Ejemplo de botas de seguridad con incorporación de punteras de seguridad <sup>4</sup>.

Hoy en día, existen muchos tipos de punteras en los zapatos de seguridad, las cuales se eligen o no considerando sus funciones, peso, rentabilidad y propiedades. Es por ello, por lo que las investigaciones más recientes se enfocan en el estudio de los materiales compuestos ya que sus grandes ventajas los hacen propicios para este tipo de aplicaciones.

# **I.2 ESTUDIO DE MERCADO**

## **I.2.1 Condiciones de trabajo de las punteras actuales**

Hoy en día, las punteras para calzado de seguridad se utilizan con el fin de proteger la parte distal del pie, la cual está sujeta a riesgo en un entorno laboral ya que existe una alta probabilidad de sufrir una lesión por golpe, corte de herramienta, punzamiento, caída de objetos pesados o fallo ergonómico. Para ello, se aplica estrictamente la norma ISO (20345:2011) elaborada por el comité técnico AEN/CTN 81 *Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo* la cual estipula las prestaciones mínimas que deben presentar las punteras de los zapatos de seguridad para poder garantizar un correcto funcionamiento.

## **I.2.2 Tipos de punteras**

### **I.2.2.1 Punteras de acero al carbono**

Actualmente, son las punteras más comunes (**Figura I.3**) ya que se trata de un material muy resistente con respecto a espesores de lámina relativamente bajos entre 1,9 mm y 2,5 mm, lo que permite que el diseño de su estructura no sea muy voluminoso y por tanto facilite la ergonomía de los dedos.

Uno de los aceros al carbono más utilizados es el acero F-115 norma UNE cuya composición química consta de un 0,55 % en carbono y 0,75 % en manganeso. Además, el estado de suministro se da en formato bruto de laminación.

Por otra parte, al tratarse de un material magnético provoca que esta propuesta no sea apta en entornos donde el personal deba de utilizar detectores de metales o prescindir de materiales con estas características (centrales nucleares, aeropuertos, muelles etc...)

Otra problemática es que el acero es un material cuya densidad media es de 7,85 g/cm<sup>3</sup> lo cual se traduce en una baja ligereza y confort si es comparado con las densidades de otros materiales utilizados. En adición, el acero es un buen conductor

## I. Introducción

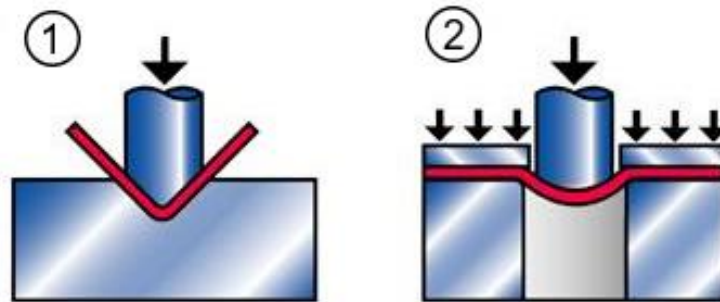
---

térmico lo que conlleva con una mala conservación del calor en el interior del calzado y por tanto limitando sus aplicaciones.



**Figura I.3** Diseño de puntera de acero al carbono utilizadas en la actualidad <sup>5</sup>.

El acero al carbono el cual se encuentra en forma de lámina es procesado mediante una prensa hidráulica la cual deforma la lámina plásticamente dentro de una cavidad o molde con la forma de la puntera y, posteriormente se realizan procesos de acabado. Es por ello que este proceso de fabricación resulta más económico con respecto a otras opciones. Este proceso queda representado en la **Figura I.4**.



**Figura I.4** Procesos de transformación mecánica del laminado circular. (1) Doblado de la base de la puntera. (2) Estirado de la chapa mediante prensa hidráulica para conseguir la forma curva de la puntera <sup>6</sup>.

### **I.2.2.2 Punteras de aluminio inyectado endurecidas por precipitación**

La puntera de aluminio endurecido por precipitación (**Figura I.5**) es un avance de la puntera de acero ya que permite alcanzar las prestaciones mecánicas de éste y, además, presenta una ligereza muy superior suponiendo el mismo espesor de lámina debido a que la densidad es de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , esto se traduce en un incremento de ligereza del 65,6% en comparación a un mismo diseño realizado en acero. Sus características lo hacen un material propicio para trabajar en ambientes sujetos a corrosión <sup>7</sup>.

Uno de las aleaciones de aluminio más utilizadas es el Aluminio 3.4370 norma DIN 1725 el cuál atendiendo a la ficha técnica ThyssenKrupp Materials Ibérica presenta una estructura química formada por el 1,6% de cobre, 2,4% manganeso y un 6% de zinc.

## I. Introducción

---



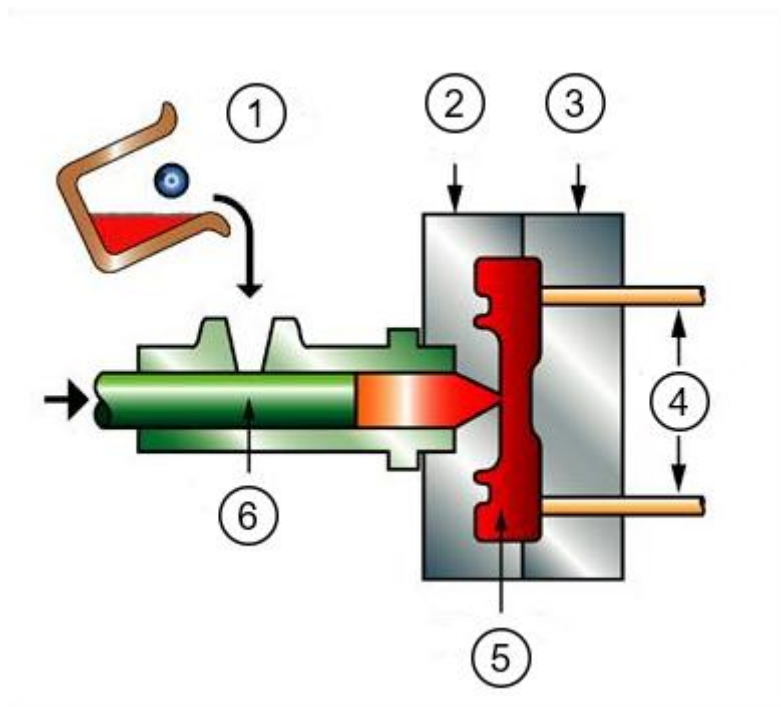
**Figura I.5** Diseño de puntera de aluminio inyectado endurecidas por precipitación <sup>4</sup>.

Por contra, el procesado del aluminio por inyección es mucho más costoso. En este proceso, el aluminio fundido es inyectado a altas presiones dentro de un molde de metal el cual se mantiene sellado hasta que se haya realizado la solidificación. Al estar procesando el material a unas temperaturas muy altas, el equipamiento de inyección debe de tener una temperatura de fusión superior a la del aluminio la cual se comprende entre 502 y 647 °C. Las altas prestaciones de la maquinaria y al tratarse de un proceso relativamente más lento que el del procesado de lámina, supone un incremento considerable en el precio final del calzado de seguridad. Las unidades obtenidas por inyección dependerán del número de cavidades que posea el molde tanto para piezas para el pie derecho como para el pie izquierdo <sup>6</sup>.

El proceso de inyección de aluminio queda representado en la **Figura I.6**.

## I. Introducción

---



**Figura I.6** Proceso de inyección de aluminio. (1) Colada de aluminio fundido. (2) Plato fijo del molde. (3) Plato móvil del molde. (4) Expulsores de pieza. (5) Cavidades. (6) Husillo <sup>6</sup>.

Además, al igual que en el caso de las punteras de acero, suponen una problemática a la hora de trabajar en entornos “metal free” donde se trabaje con arcos de detección de metales.



## **I.2.2.3 Punteras de material compuesto**

Las punteras de material compuesto están formadas como su nombre indica por dos materiales, uno que actúa como refuerzo normalmente en forma de fibras tejidas unidireccionales como se aprecia en la **Figura I.13** y otro que actúa como matriz. Esto provoca que el material compuesto supere con creces a las propiedades mecánicas y resistentes de sus elementos por separado <sup>8</sup>.

El comportamiento elástico de este tipo de materiales permite un ensamblaje en el calzado más sencillo y por ende un mayor confort y ergonomía. Dicha propiedad facilita la extracción del pie del zapato en caso de aplastamiento puesto que permite recuperar la deformación producida tras un impacto al poseer grandes límites elásticos. Por otro lado, las punteras de acero y aluminio quedan deformadas permanentemente generando de esta forma un mayor riesgo <sup>9</sup>.

Las punteras de material compuesto, son materiales considerablemente más ligeros que las punteras de acero y de aluminio debido a que la densidad de éstos oscila entre  $1,3 \text{ g/cm}^3$  y  $2,1 \text{ g/cm}^3$  aproximadamente en función de que materiales se usen y en que volumen se encuentren.

Como ventaja, también se presenta una mayor conservación de la temperatura al tratarse de un material aislante.

El diseño de este tipo de materiales presenta una mayor dificultad a la hora de garantizar la resistencia frente a los impactos y a la compresión, es por ello que, el espesor de lámina es considerablemente mayor al de las punteras de acero o aluminio.

En el mercado, se suelen encontrar en su mayoría punteras cuya matriz se compone de resina de poliéster y su refuerzo de fibra de vidrio como se aprecia en la **Figura I.7** o en su defecto, matrices epoxídicas junto a refuerzos de fibra de carbono. Uno de los problemas que se presentan, es que éstos no son materiales eco-eficientes, esto quiere decir que el impacto ambiental generado es mucho mayor que el valor añadido obtenido y, además, no son biodegradables y su procesado es irreversible lo que implica

## I. Introducción

---

que una vez las punteras sean procesadas, sus componentes no pueden volver a su estado inicial lo que aumenta todavía más el impacto medioambiental.

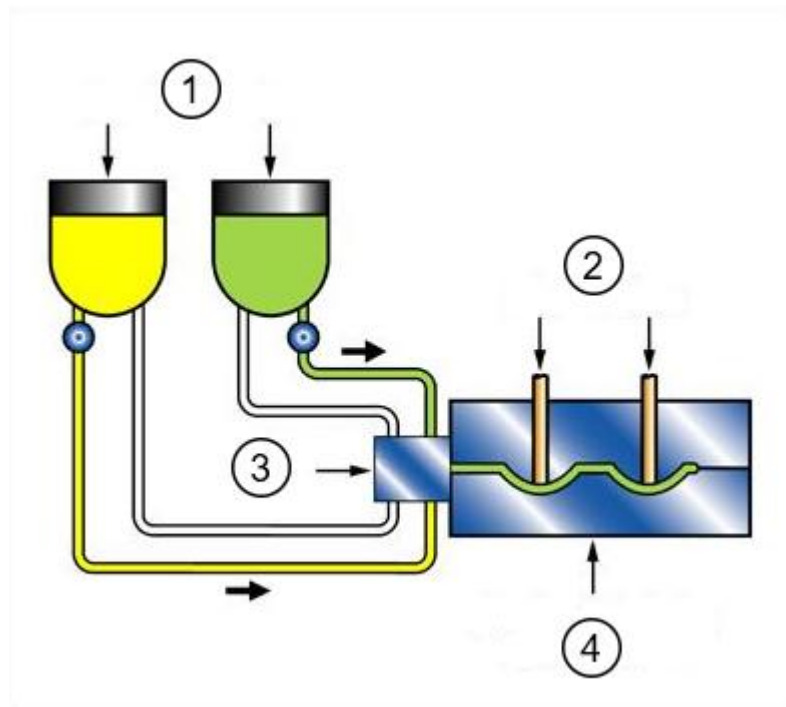


**Figura I.7** Puntera de material compuesto con matriz de resina de poliéster y refuerzo de fibra de vidrio.

Como se puede ver en la **Figura I.8**, las punteras de materiales compuestos se fabrican mediante procesos de moldeo por transferencia de resina (RTM). En este proceso se utilizan moldes cerrados con puntos de inyección de resina y respiraderos para permitir escapar el aire. Dentro del molde, se sitúa el tejido de fibras de refuerzo según la orientación deseada y posteriormente se llena mediante bombeo de la resina previamente mezclada con el endurecedor. Este proceso da como resultado un precio resultante superior al de las punteras de acero, pero, sin embargo, mejora económicamente con respecto a las punteras de aluminio <sup>6</sup>.

## I. Introducción

---



**Figura I.8** Proceso de fabricación de punteras de protección para calzado de seguridad realizadas por moldeo por transferencia de resina (RTM). (1) Bombeo de resina y endurecedor al molde. (2) Expulsores. (3) Cámara de mezcla y transferencia. (4) Molde con la forma de la pieza.

# **I.3 MATERIALES UTILIZADOS**

## **I.3.1 Acero fino al carbono F-115**

En la actualidad, el acero más utilizado en las punteras para calzado de seguridad es el acero fino al carbono F115 <sup>10</sup> norma UNE el cual es un acero recocido y estirado en frío. Este tipo de acero se emplea debido a que presenta una resistencia a la rotura muy elevada en comparación a otros aceros al carbono al estar compuesto por un mayor porcentaje de carbono, y a pesar de que existan aceros con mejores propiedades, éste presenta una relación entre prestaciones y economía, muy elevada, adecuada para la aplicación.

### Ventajas

- Alto límite a la tracción.
- Mayor resistencia.
- Mejor dureza.
- Alta tenacidad.
- Mayor resistencia a la compresión.
- Espesores de lámina en el diseño entre 2 y 2,4mm.

### Desventajas

- Densidad elevada.
- No apto para entornos denominados “metal free”.
- Conductor térmico.

## I. Introducción

---

**Tabla I.1** Propiedades mecánicas del acero F115 recocido y estirado en frío.

Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Límite elástico	755 MPa
Carga de rotura a tracción	840 MPa
Módulo elástico	205 GPa
Módulo de cortadura	80 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29

### **I.3.2 Aluminio inyectado endurecido por precipitación**

Al tratarse de un material con una densidad muy inferior a la del acero, las propiedades resistentes de éste son inferiores. Para ello, los aluminios utilizados normalmente en punteras de protección, son tratados con un proceso de envejecimiento térmico el cuál dota al material de unas mejores propiedades mecánicas para la aplicación estudiada.

De este modo, las familias de aluminios más utilizadas en punteras de seguridad son las siguientes <sup>11</sup>:

- Series 2000: Aluminios-Cobre
- Series 6000: Aluminio-Magnesio-Silicio
- Series 7000: Aluminio-Zinc

Dentro de estas series, las más utilizadas son las aleaciones aluminio-zinc puesto que presentan unas mejores propiedades resistentes. Uno de estos materiales, es la aleación de aluminio 3.4370, con un porcentaje del 1,6% de carbono, 2,4% de manganeso y 6% de zinc en su estructura química.

# I. Introducción

---

Las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 3.4370 se pueden consultar en la **Tabla I.2** <sup>12</sup>.

**Tabla I.2** Propiedades mecánicas de la aleación aluminio 3.4370 obtenidas en Thyssen Krupp Materials Ibérica.

Densidad	2,82 g/cm <sup>3</sup>
Módulo Elástico	72 GPa
Módulo de Cortadura	28 GPa
Módulo de compresibilidad	72 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Carga de rotura a tracción	550 MPa
Carga de rotura a compresión	385 MPa
Límite elástico	510 MPa

## **I.3.3 Materiales compuestos**

Los materiales compuestos se definen como aquellos cuya estructura está conformada por un elemento que actúa como matriz o base y otros elementos que actúan como refuerzo de manera que las prestaciones obtenidas en el compuesto superan a las de cada elemento por separado <sup>8</sup>.

Los elementos de refuerzo o fibras de refuerzo se orientan en el plano y se encuentran embebidas en la matriz, es por ello que el material compuesto se trata de un material anisotrópico, es decir, sus propiedades varían según la dirección en la que se estudien. De esta forma, se debe de investigar el tipo y la orientación de las fibras de refuerzo, el tipo de matriz y el proceso de fabricación para poder aproximarse a un comportamiento isotrópico (materiales cuyas propiedades son las mismas independientemente de la dirección considerada).

# I. Introducción

---

## Ventajas

- Alta resistencia.
- Alta rigidez.
- Baja densidad.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Amplio abanico de materiales según orientación, tipo de matriz o fibra y proceso de fabricación.
- Uso en entornos “metal free”.

## Desventajas

- En el caso de los compuestos de matriz orgánica, las prestaciones disminuyen con respecto al acero o el aluminio.
- Mayores espesores en el diseño

### **I.3.3.1 Clasificación de los compuestos**

Los materiales compuestos se clasifican principalmente atendiendo a la naturaleza de la matriz utilizada. En su gran mayoría, se encuentran los siguientes grupos:

- **Compuestos de matriz metálica:** La ventaja que presentan es que el material conserva las prestaciones de la matriz metálica a altas temperaturas.
- **Compuestos de matriz cerámica:** Se utilizan principalmente en entornos donde se necesite una buena resistencia a altas temperaturas o en aplicaciones donde se necesite resistencia al desgaste.
- **Compuestos de matriz orgánica:** Aquellos materiales que utilizan matrices poliméricas junto a fibras de refuerzo tanto de procedencia orgánica como inorgánica. Se trata de materiales cuyas altas prestaciones los convierten en materiales idóneos para aplicaciones donde la ligereza es determinante.

Es por ello, que los materiales compuestos de matriz orgánica por sus características, son los que presentan un mayor interés en aplicaciones con responsabilidad mecánica y necesidad de ligereza.

## **I.3.3.2 Matrices poliméricas**

Las matrices poliméricas son el elemento del compuesto cuya función es la de dar forma y estabilidad al material. De esta forma, la matriz actúa como soporte de las fibras de modo que se permita el moldeo y la disposición de las fibras según se desee.

Entre otras propiedades, la matriz será la encargada de soportar los esfuerzos de compresión que las fibras no son capaces de trabajar y, además, de transmitir los esfuerzos a las fibras por cortadura. Por tanto, la interacción matriz-fibra produce un efecto de sinergia el cual dota al material compuesto de unas altas prestaciones.

Las matrices de polímero termoestable representan aproximadamente el 85% del mercado, mientras que las matrices termoplásticas representan el 15%. Por otro lado, existe la posibilidad de utilizar matrices de polímero elastómero puesto que su uso es cada vez más común.

### Funciones

- Protección a los agentes externos.
- Protección de las fibras frente a esfuerzos de compresión.
- Transmisión de esfuerzos a las fibras.
- Procesabilidad y forma al compuesto.
- Evitar propagación de grietas en el proceso de fractura.

### **I.3.3.2.1 Matrices poliméricas usadas en punteras para calzado de seguridad**

Actualmente, las matrices poliméricas más utilizadas en ámbitos mecánicos son las resinas termoestables puesto que su proceso de fabricación y moldeo es menos costoso y complicado que el de las matrices termoplásticas cuyas propiedades sean equiparables a las de éstas.

El método de aplicación de los materiales termoestables consiste en una reacción de entrecruzamiento entre la resina y el endurecedor, los cuales llevan a cabo un proceso exotérmico en el cual la resina se rigidiza. De esta forma, una vez se han mezclado ambos componentes atendiendo a su ratio estequiométrico se procede a su aplicación



# I. Introducción

---

impregnando las fibras de refuerzo ya orientadas. Una vez finalizada la reacción de entrecruzamiento, se consigue el material compuesto con las propiedades deseadas.

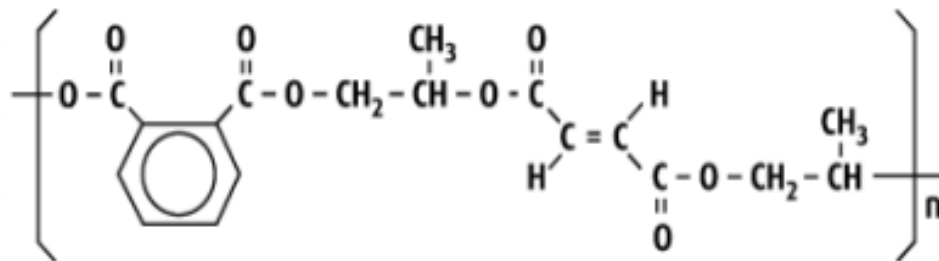
## **Resina de poliéster insaturado**

El campo de aplicación de las resinas UP consiste en su mayoría en actuar como matriz en un material compuesto. En comparación a otras resinas utilizadas en el campo del calzado, ésta presenta menores propiedades mecánicas las cuales son suplidas por un bajo precio.

La resina se suministra en un 70% de su peso como base y un 30% en peso de estireno el cual actúa como diluyente reactivo, además, impiden que se realice la reacción química entre otros componentes utilizando como inhibidor hidroquinona.

Por otro lado, se emplea como iniciador peróxido de metil etil cetona (PMEK) y octoato de cobalto como promotor para iniciar el proceso de curado del material.

En la **Figura I.9** se aprecia la estructura de las resinas de poliéster insaturado.



**Figura I.9** Monómero de resina base de poliéster insaturado.

### Ventajas

- Resina termoestable más económica.

### Desventajas

- Bajas propiedades mecánicas con relación a otras resinas.
- Contracción en el proceso de curado.

# I. Introducción

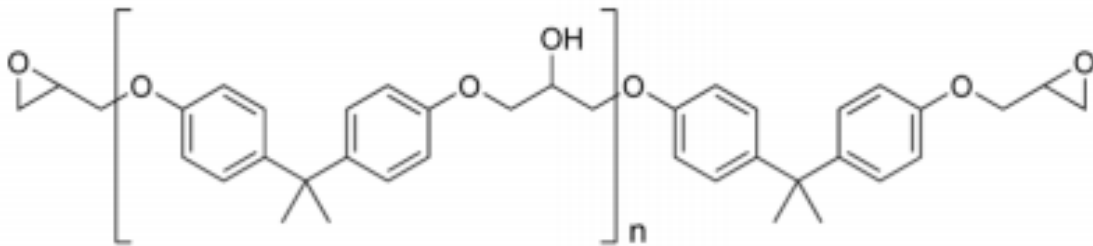
---

- No es un material eco-eficiente.

## **Resinas epoxídicas**

Desde su primera fabricación, las resinas EP (**Figura I.10**) han sido utilizadas en los compuestos avanzados, es decir, aquellos que necesitan matrices con altas características mecánicas y térmicas donde el factor económico no es el objeto principal.

Sus principales aplicaciones son en deportes de alto rendimiento, tecnología militar, aeronáutica y en condiciones de trabajo con responsabilidad.



**Figura I.10** Monómero de resina epoxídica.

### Ventajas

- Altas prestaciones mecánicas.
- Altas prestaciones térmicas.

### Desventajas

- Absorción de humedad y, por tanto, disminución de propiedades mecánicas.
- Precio elevado.
- No es un material eco-eficiente.

## **I.3.3.3 Elementos de refuerzo**

Las fibras de refuerzo son materiales que se utilizan en los compuestos con el fin de transferir al material resultante las buenas propiedades resistentes que presentan. Dicha resistencia, se debe principalmente al buen acabado y falta de defectos sobre su

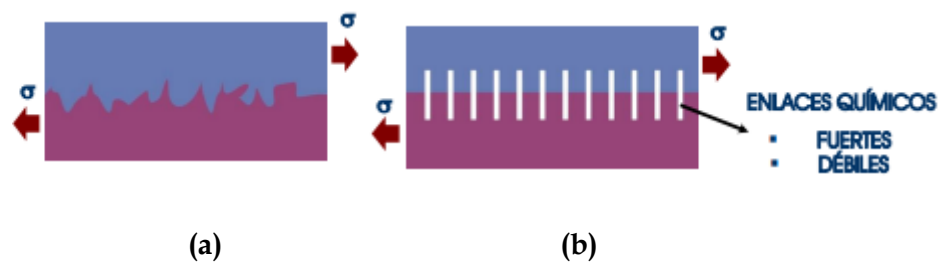
# I. Introducción

---

superficie, es por ello que las fibras son tratadas mediante estiramiento durante su fabricación para que su superficie no se vea afectada y se garantice una buena interacción fibra-matriz. Las fibras se clasifican según su origen:

- Origen orgánico: Fibras de carbono, fibras de polietileno UHMWPE, copoliéster aromático etc...
- Origen inorgánico: Fibras metálicas, fibras de boro, fibras de vidrio etc...

Además, la interacción entre la fibra y matriz puede ser modificada mediante uniones mecánicas atendiendo a sus rugosidades como se aprecia en la **Figura I.11**, mediante uniones químicas utilizando elementos químicos llamados agentes de acoplamiento o bien, mediante uniones electrostáticas.



**Figura I.11** Interacción entre matriz y fibra mediante fenómenos de adhesión. a) Interacción mecánica. b) Interacción química.

La estructura molecular de la fibra se encuentra orientada en la dirección de su mismo eje, esto provoca que su alta resistencia es resultante en esta misma orientación.

De esta manera, las características de un material compuesto varían atendiendo al volumen de fibra cuyos valores oscilan entre el 20% y el 70% y a la orientación de las fibras las cuales se presentan de distintas formas.

## **Fieltro MAT y fibras cortadas**

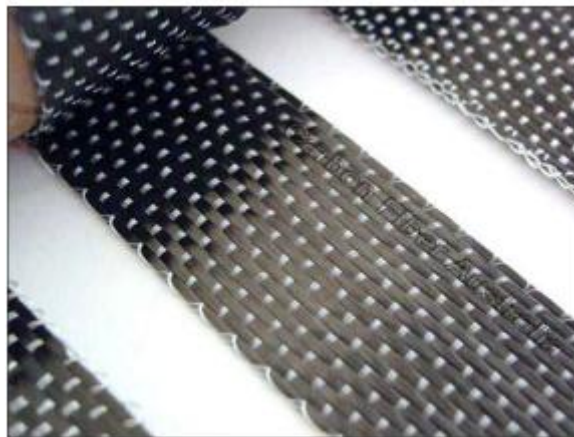
Son estructuras textiles las cuales consiguen un comportamiento cuasi-isotrópico debido a su carácter poco direccional, en cambio no presentan unas altas resistencias o rigideces elevadas. Por tanto, se utilizan como refuerzo para aplicaciones con poca carga mecánica. En la **Figura I.12** se aprecian ejemplos de fieltros y fibras cortadas.



**Figura I.12** Refuerzos tipo fibra cortada y tipo MAT.

### **Fibra larga unidireccional**

Son fibras orientadas en una misma dirección y que se encuentran unidas entre sí mediante una fibra auxiliar muy ligera la cual permite la unión pudiendo formar una estructura en forma plana como se puede ver en la **Figura I.13**.



**Figura I.13** Fibra larga unidireccional de carbono.

### **Tejido biaxial**

Se trata de un sistema compuesto por fibras orientadas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  sobre el plano entrecruzadas entre sí (**Figura I.14**). De esta forma, la mitad de las fibras a  $90^\circ$  se sitúan por debajo de las de  $0^\circ$  y el resto por encima.

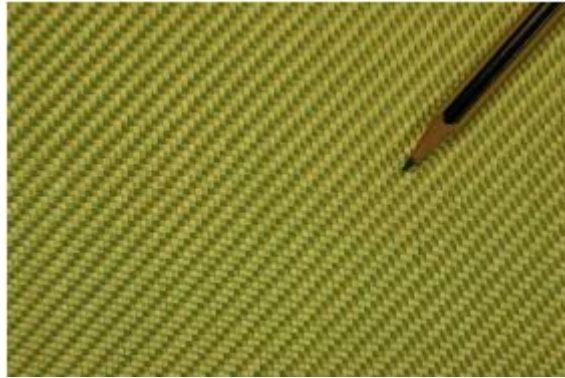


Figura I.14 Tejido biaxial de fibra de aramida.

### **Tejido multiaxial**

Es un tipo de tejido muy utilizado debido a que consigue altos volúmenes de fibra y aproxima el material compuesto a un comportamiento cuasi-isotrópico, además se facilita la adaptación a formas complejas. Un tipo de tejido multiaxial podría ser el tejido triaxial como el que se representa en la **Figura I.15**.



Figura I.15 Tejido triaxial de fibra de carbono.

### **I.3.3.3.1 Elementos de refuerzo utilizados en punteras de protección**

#### **Fibras de vidrio**

La fibra de vidrio es el material de refuerzo más utilizado dentro del campo de los materiales compuestos en el mundo de la ingeniería. Esto se debe a que su

# I. Introducción

---

producción es muy variada en tanto que formas y presenta una relación entre precio y prestaciones mecánicas muy elevada.

Se obtiene mediante la fusión de la mezcla de sílice principalmente en combinación con distintos óxidos como lo son la alúmina o los alcalinos. De esta manera, el material resultante se estira y se procesa hasta obtener la forma y los espesores deseados (**Figura I.16**). La elevada resistencia que se presenta en este tipo de fibra se debe a las uniones entre el silicio y los radicales de oxígeno mediante enlaces covalentes tal como se aprecia en la **Figura I.17**.



**Figura I.16** Producción, estirado y tejido de fibras de vidrio <sup>13</sup>.

## Ventajas

- Variedad en sus formas (tejido, mallado...).
- Buenas prestaciones mecánicas en relación al precio.
- Económicas.
- Baja dilatación térmica
- Baja conductividad térmica.
- Buena resistencia en ambientes corrosivos o húmedos.
- Alta interacción matriz-fibra con todas las resinas.

## Desventajas

- Prestaciones mecánicas medianas en comparación a otras fibras del mercado (fibras de carbono, aramida, UHDPPE...).
- No es un material eco-eficiente.

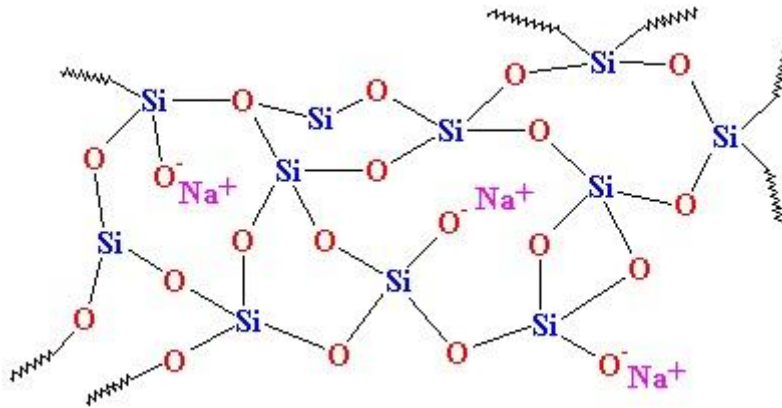


Figura I.17 Estructura de la fibra de vidrio.

## Fibras de carbono

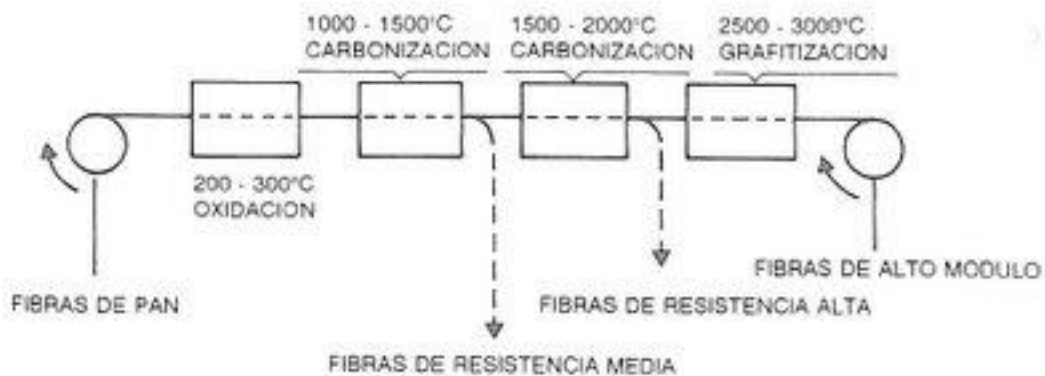
En la actualidad, la fibra de carbono se emplea en varias aplicaciones donde se necesitan materiales con altas prestaciones mecánicas y altas rigideces, por tanto, se sustituye la aplicación de la fibra de vidrio por la de ésta.

Las fibras de carbono se obtienen a partir de procesos de pirolisis como se aprecia en la **Figura I.18** a partir de varias etapas de transformación, donde se acaban eliminando los átomos de nitrógeno e hidrógeno de las materias primas utilizadas como lo son las fibras de poliacrilonitrilo o la brea (precio resultante más económico). Comprobando de esta forma, la estructura de las fibras de carbono (**Figura I.19**) y atendiendo a la temperatura del procesado del material, se pueden obtener materiales con distintas propiedades, los cuáles son:

- Fibras de carbono de resistencia media.
- Fibras de carbono de alta resistencia. (HT)
- Fibras de carbono de alto módulo (HM).
- Fibras de carbono de alta resistencia y módulo (HST).

# I. Introducción

---



**Figura I.18** Esquema de los procesos de obtención de fibra de carbono a partir de las fibras de poliacrilonitrilo.

## Ventajas

- Protección frente a ralladura.
- Baja densidad.
- Alta resistencia a la humedad.
- Baja dilatación térmica.
- Buena resistencia a temperatura en atmosferas no oxidantes.
- Altas propiedades mecánicas.
- Alta resistencia química frente a la temperatura.

## Desventajas

- Precio elevado.
- Baja resistencia a la cizalladura.
- Dificultades en su procesado al tratarse de un material frágil.
- Baja resistencia al impacto.
- Mala resistencia química en frente al oxígeno, ácidos oxidantes y metales.



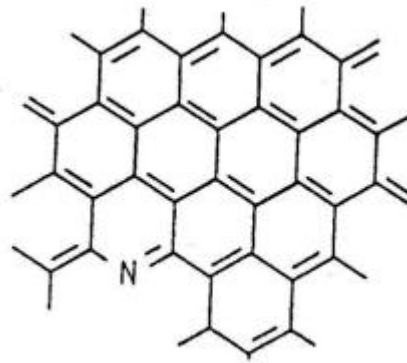


Figura I.19 Estructura gráfica de las fibras de carbono.

### I.3.4 Tendencia del mercado y nuevas propuestas

Hasta ahora, las principales premisas de los materiales eran las de cumplir con especificaciones técnicas como pueden ser las propiedades resistentes, elásticas, térmicas etc... pero descuidando en cierto modo el impacto medioambiental que podría suponer su fabricación o bien el proceso de reciclado y reutilización. Este impacto ambiental se genera en el transcurso del ciclo de vida, abarcando desde la obtención del material hasta su disposición. El ciclo de vida <sup>14</sup> queda representado en la **Figura I.20**.

Es por ello que surge el término eco-eficiencia <sup>15</sup>, el cual establece que se debe proporcionar los bienes y servicios de manera que cumplan con sus especificaciones establecidas y, además, se reduzca progresivamente el impacto ambiental generado durante su proceso y uso.

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Valor del producto}}{\text{Impacto medioambiental generado}}$$

De este modo, la tendencia en la ingeniería de los materiales se está direccionando de tal manera que se buscan materiales que puedan sustituir a otros no eco-eficientes cumpliendo además las condiciones de trabajo establecidas.

# I. Introducción

---



**Figura I.20** Análisis del ciclo de vida para evaluar el impacto medio ambiental.

Los materiales compuestos, como se determina anteriormente en el apartado **I.3.3 Materiales compuestos**, se componen principalmente por dos elementos, la matriz y el refuerzo. En muchas ocasiones, ambos componentes o bien no son reciclables y se tratan de procesos irreversibles como son las resinas termoestables (EP, UP etc...) o bien la fuente de obtención es de origen sintético o artificial provocando de esta forma un alto impacto ambiental (fibras de aramida, fibras de carbono, fibras de vidrio etc...).

Por tanto, se estudia la posibilidad de utilizar un material compuesto en punteras para calzado de seguridad donde se consiga obtener una eco-eficiencia óptima para cada uno de sus elementos. Es por ello, que como nuevas propuestas se investigarán los materiales termoplásticos de altas prestaciones como alternativa a los compuestos o bien compuestos cuyas fibras de refuerzo sean naturales.

## **I.3.4.1 Materiales de origen BIO y/o biodegradables**

Se entiende por material de origen BIO a aquel el cual su obtención no haya sido realizada a partir de una reserva no renovable. De este modo, surge el concepto biopolímero que se define como aquellas estructuras moleculares compuestas por repeticiones de un monómero, que se obtienen de otras fuentes distintas a las reservas fósiles no renovables, como lo son los derivados de la industria petroquímica <sup>16 17</sup>.

La utilización de biopolímeros supone una disminución en el impacto ambiental generado, facilitando una huella de carbono inferior a la de los polímeros de origen fósil y disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero.

# I. Introducción

---

Para la síntesis de los biopolímeros se utilizan fuentes de carbono de origen renovable como son los azúcares existentes en cultivos (lino, yute, cáñamo...) o a partir de residuos industriales (biomasas, residuos de diésel...).

Por otro lado, otra de las grandes ventajas de algunos biopolímeros es que resultan ser biodegradables. Esto significa que estos materiales, son capaces de descomponer su estructura para transformarse en los elementos químicos que los conforman, a partir de agentes biológicos existentes en condiciones naturales.

## **Diseño en biopoliamida 10-10(PA)**

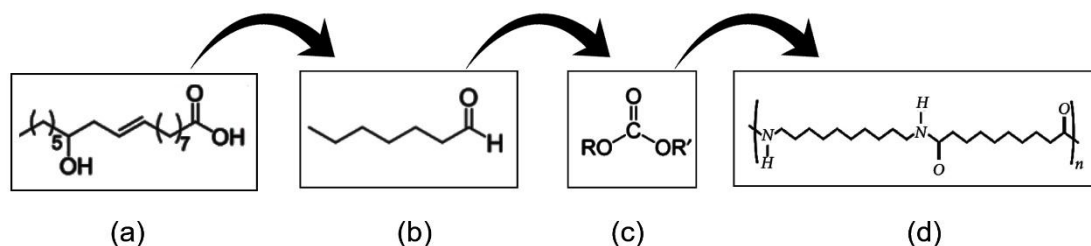
La bioPA es un material polimérico termoplástico de origen 100% natural y que se encuentra clasificado dentro de la categoría de los polímeros de aplicación técnica puesto que presenta unas altas prestaciones <sup>18</sup>.

El origen 100% natural de la bioPA 10-10 se debe a que este polímero se sintetiza a partir del aceite de ricino obtenido de las semillas de ricino, es decir, se trata de un aceite de procedencia vegetal. Las semillas de ricino provienen de la planta *Ricinus communis* la cual se encuentra de forma abundante en climas tropicales o subtropicales donde crece de forma natural y es cultivada anualmente. Es por tanto que, los principales países productores de aceite de ricino son India, China, Brasil y Tailandia <sup>19</sup>.

El aceite se compone principalmente por ácidos grasos, ácidos ricinoleicos y en menor medida por ácidos saturados e insaturados. Al tratarse de un aceite tóxico para el ser humano y poseer una alta producción, se favorece su uso en la síntesis de biopolímeros.

Para la síntesis de la bioPA se aplica un tratamiento térmico de pirólisis a temperaturas superiores a 400°C al aceite de ricino. De esta forma, se obtienen moléculas de Heptanal a partir de las cuales se deriva un carbonatoéster con el que se realiza el proceso final de síntesis. Esta síntesis se puede observar en la **Figura I.21**.

# I. Introducción



**Figura I.21** Síntesis de bioPA a partir de aceite de ricino. (a) Aceite ricinoleico. (b) Heptanal. (c) Carbonatoéster. (d) Monómero de bioPA.

Uno de los principales fabricantes de bioPA es la empresa NaturePlast en cuyo catálogo se encuentran distintos tipos de categorías según el proceso de fabricación y contenido BIO. (Tabla I.3) <sup>20</sup>.

**Tabla I.3** Propiedades mecánicas de la bioPA 10-10 <sup>20</sup>.

Módulo elástico	1,7 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo cortante	653,85 MPa
Densidad de masa	1,07 g/cm <sup>3</sup>
Carga de rotura a la tracción	83 MPa
Límite elástico	60 MPa

## Ácido poliláctico (PLA)

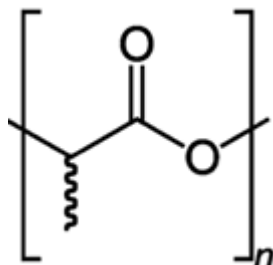
El PLA pertenece a la familia de los biopolímeros termoplásticos ya que el ácido poliláctico se sintetiza a partir de materiales base provenientes del almidón de maíz o yuca o de la caña del azúcar <sup>21</sup>.

Se trata de un material cuyo contenido BIO es 100% natural y, además, debido a su estructura, representada en la **Figura I.22**, se comprueba cómo es un material capaz

# I. Introducción

---

de descomponerse en los componentes que lo conforman por acción del medio natural. Esto implica que se trata de un material 100% de origen natural y 100% biodegradable.



**Figura I.22** Monómero de ácido poliláctico.

Existen varios fabricantes de PLA, pero en la actualidad uno de los fabricantes más importantes es NatureWorks el cual suministra varios tipos de biopolímeros, siendo uno de estos PLA. (Tabla I.4) <sup>22</sup>.

**Tabla I.4** Propiedades mecánicas del ácido poliláctico (PLA).

Módulo elástico	3,5 GPa
Coefficiente de Poisson	0,39
Densidad de masa	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Carga de rotura a la tracción	60 MPa
Límite elástico	53 MPa
Módulo cortante	1,25 GPa

## **Resinas termoestables EP con contenido BIO**

En la actualidad, se están investigando nuevas resinas termoestables cuyo porcentaje en contenido BIO es cada vez mayor. Con ello, se consigue disminuir el impacto medioambiental producido debido a la irreversibilidad del proceso gracias al contenido BIO de ésta.

# I. Introducción

---

El contenido BIO que se incorpora en las nuevas resinas EP principalmente son diluyentes reactivos procedentes de plantas que reducen la viscosidad de éstas y facilitan la aplicación.

Hoy en día, uno de los principales fabricantes de sistemas de resina termoestable EP con contenido BIO, es la empresa Castro Composites. Éstos, suministran la gama ECO donde se pueden encontrar resinas epoxy con hasta un 37% en contenido BIO.

En la **Tabla I.5**, se puede comprobar las propiedades mecánicas que poseen éstos sistemas epoxy <sup>23</sup>.

**Tabla I.5** Propiedades mecánicas resina epoxy RESOLTECH 1070 de Castro Composites.

<b>Em</b>	3,55 GPa
<b>Vm</b>	0,35
<b>Gm</b>	1,31 GPa
<b>Xtm</b>	55 MPa
<b>Xcm</b>	103 MPa
<b>Sm</b>	55 MPa
<b>pm</b>	1,2 g/cm <sup>3</sup>

## **1.3.4.2 Fibras naturales**

### **Fibra de lino**

La fibra de lino es un material que proviene del procesado de la planta de lino y que cada vez es más utilizada dentro de los materiales compuestos ya que además de ofrecer unas prestaciones buenas en determinadas aplicaciones, consigue reducir ampliamente el impacto ambiental producido de manera que se mejora la eco-eficiencia del compuesto <sup>24</sup>.

# I. Introducción

---

Se clasifica como una fibra natural eco-eficiente ya que en su procesado se requiere de una menor utilización de agua y productos químicos <sup>25</sup>.



Figura I.23 Tejido de fibra de lino.

## **Fibra de yute**

Se trata de otro tipo de fibra de origen natural y 100% biodegradable cuya procedencia es de la corteza de la planta del yute rojo o blanco <sup>26</sup>.

La fibra de yute en algunas aplicaciones sustituye a otro tipo de fibras como lo son las de vidrio debido a que sus propiedades mecánicas y resistentes permiten cumplir con las especificaciones necesitadas.

### Ventajas

- Densidades bajas (menores que las fibras de lino).
- Baja conductividad térmica.
- Reciclable.
- Biodegradable 100%.

### Desventajas

- Propiedades mecánicas inferiores a las de las fibras de vidrio.

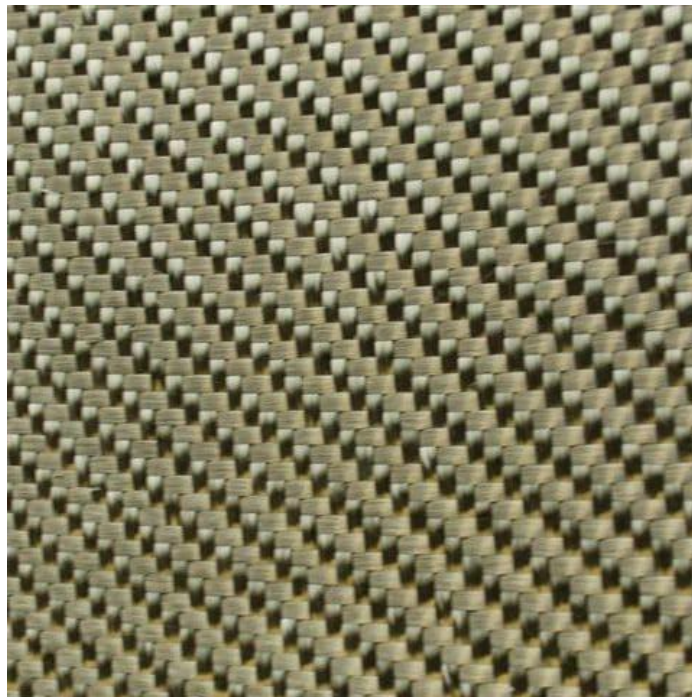
# I. Introducción

---

## **Fibra de basalto**

El basalto se forma cuando la lava de un volcán solidifica, dando lugar a roca volcánica básica la cual se compone normalmente de minerales ferromagnesianos piroxenos <sup>27</sup>.

De esta forma, el basalto se somete a un proceso de pultrusión y estirado, donde la roca basáltica se funde y por consiguiente se estira y bobina, obteniendo por tanto fibra continua de basalto <sup>28 29</sup>.



**Figura I.24** Tejido de fibra de basalto.



## **II OBJETIVOS**

## **II. Objetivos**

---

## **II. Objetivos**

---

### **II.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo central del presente proyecto de fin de grado consiste en el desarrollo de punteras de protección para calzado de seguridad profesional. En el trabajo, la puntera se desarrollará y fabricará con materiales compuestos eco-eficientes y de carácter biodegradable. El estudio del proyecto se abordará desde diversas disciplinas dentro del ámbito de la Ingeniería Mecánica: diseño CAD, ingeniería inversa, selección de material, fabricación, estudio de prestaciones mecánicas-dimensionamiento y estudio económico.

### **II.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Selección de materiales compuestos cuyas propiedades sean las adecuadas para las punteras de calzado profesional de seguridad.
2. Diseño CAD, utilizando el software de diseño Solidworks, de las punteras considerando los requerimientos técnicos de este tipo de pieza y estudio según la normativa de las diversas soluciones desarrolladas.
3. Simulación de condiciones de trabajo y análisis estático de deformaciones/rotura en condiciones de servicio mediante herramientas basadas en el método de los elementos finitos.
4. Estudio de viabilidad económica del producto sobre la plataforma CES-Edupack

## **II. Objetivos**

---

**III DESARROLLO DEL  
TRABAJO**

### **III. Desarrollo del trabajo**

---

## III. Desarrollo del trabajo

### III.1 DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS

En esta sección, se va a realizar el diseño del prototipo de la puntera de seguridad utilizando la herramienta SolidWorks.

Antes de empezar con el diseño, se realiza la ingeniería inversa a una puntera extraída de un zapato de seguridad *J'hayber Works Sport Line Premium* talla 38 para el pie derecho y fabricada en material compuesto por fibra de vidrio y resina UP. Con estos datos, se realizará el diseño 3D para su posterior optimización en el diseño y en los resultados en base a los diversos materiales aplicados.

En primer lugar, se realizará el diseño de la planta, para ello, se toman varios puntos de la puntera a diseñar y se dibuja la curva resultante entre estos (**Figura III.1**).

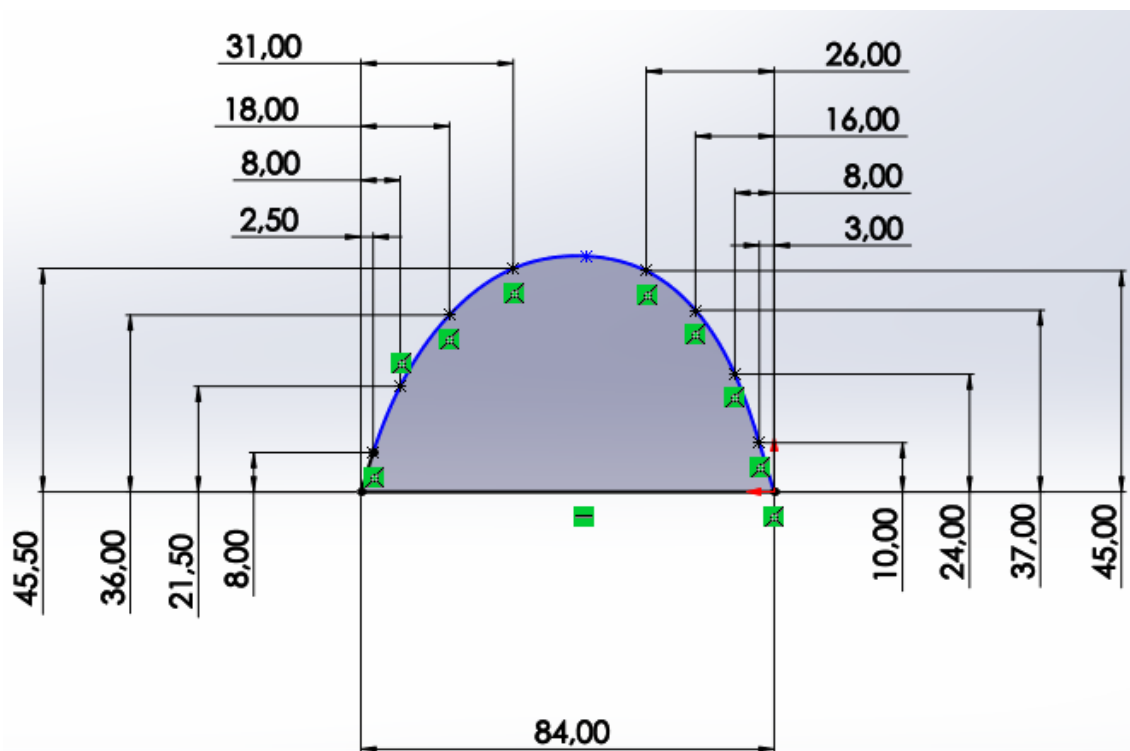


Figura III.1 Dibujado de la planta de la puntera. Unidades en milímetros.

### III. Desarrollo del trabajo

A continuación, se miden y dibujan de la misma manera varios puntos para poder realizar tanto el alzado (Figura III.2) como el perfil (Figura III.3).

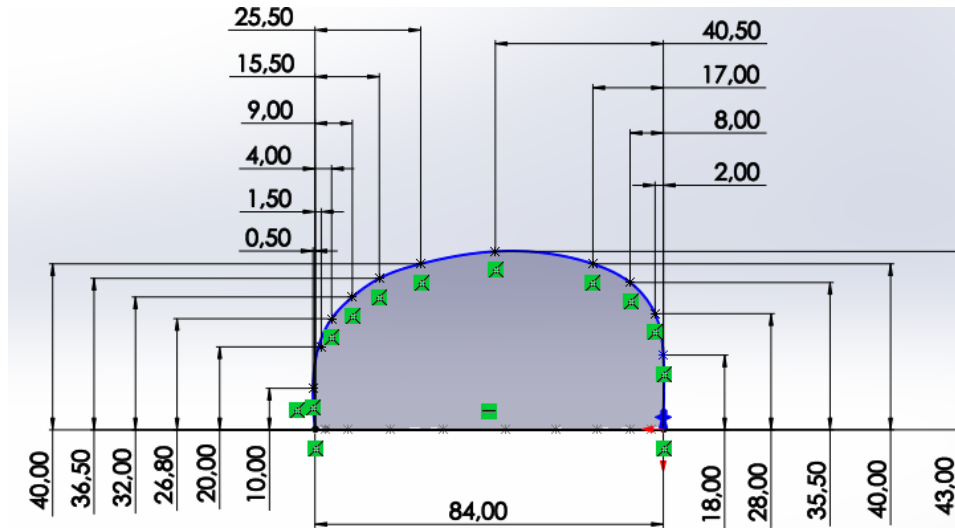


Figura III.2 Dibujo del alzado de la puntera. Unidades en milímetros.

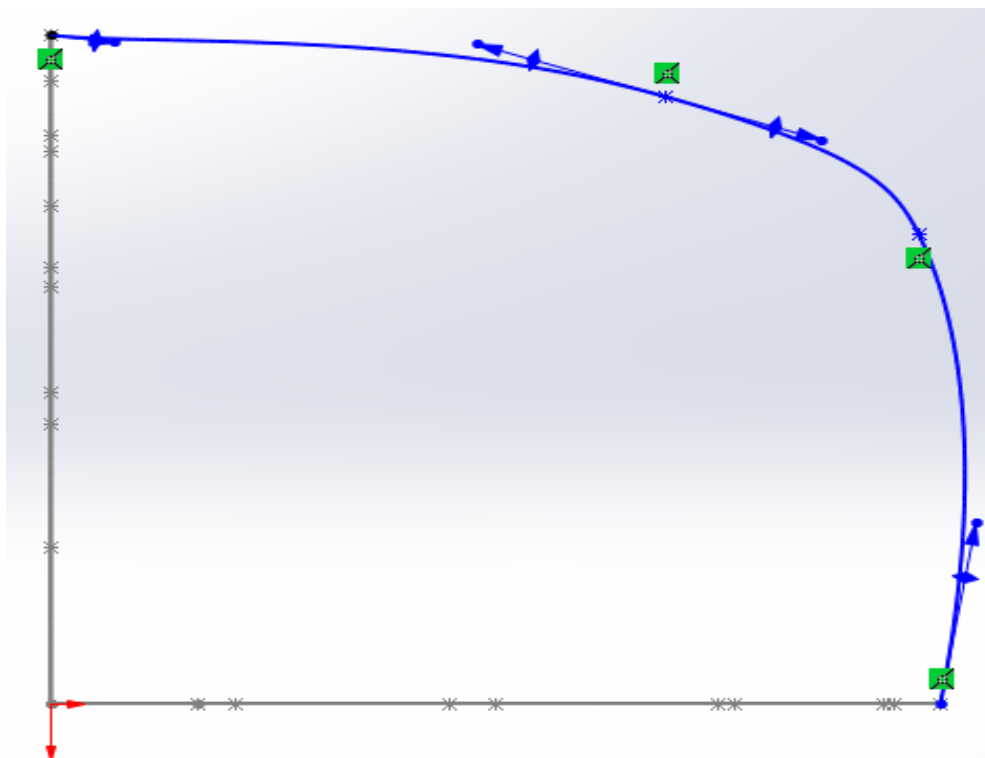


Figura III.3 Dibujo del perfil de la puntera.

Seguidamente, al tratarse de una pieza compuesta por policurvas se debe de utilizar el complemento de diseño "superficies" para poder realizar el dibujo. Para



### III. Desarrollo del trabajo

---

ello, se utiliza el comando barrer superficie y se seleccionan alzado, planta y perfil para realizar el contorno (Figura III.4).

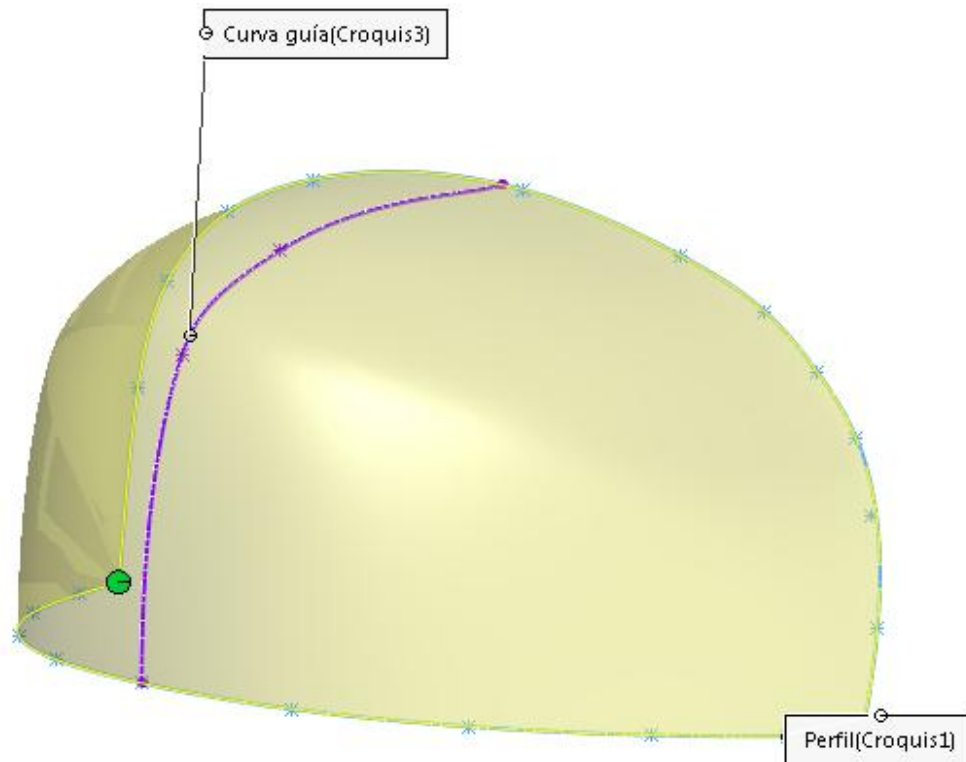
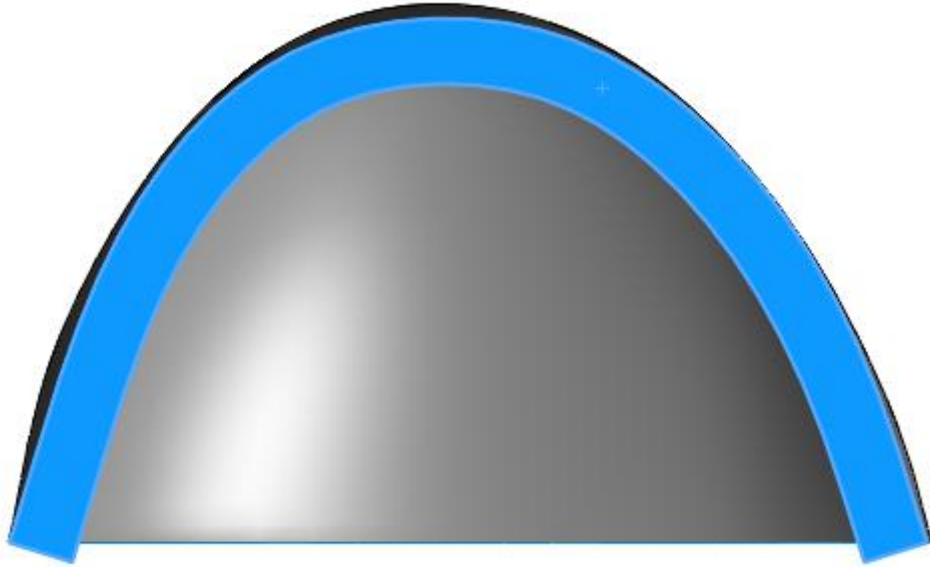


Figura III.4 Operación de barrido de superficie.

Por consiguiente, se realiza un croquis sobre la planta para dibujar la base de la pieza sobre la cual se montarán las solapas de cuero de los zapatos. Para ello, se crea un croquis equidistante a 6mm de la base y se utiliza la operación rellenar superficie (Figura III.5).

### III. Desarrollo del trabajo

---

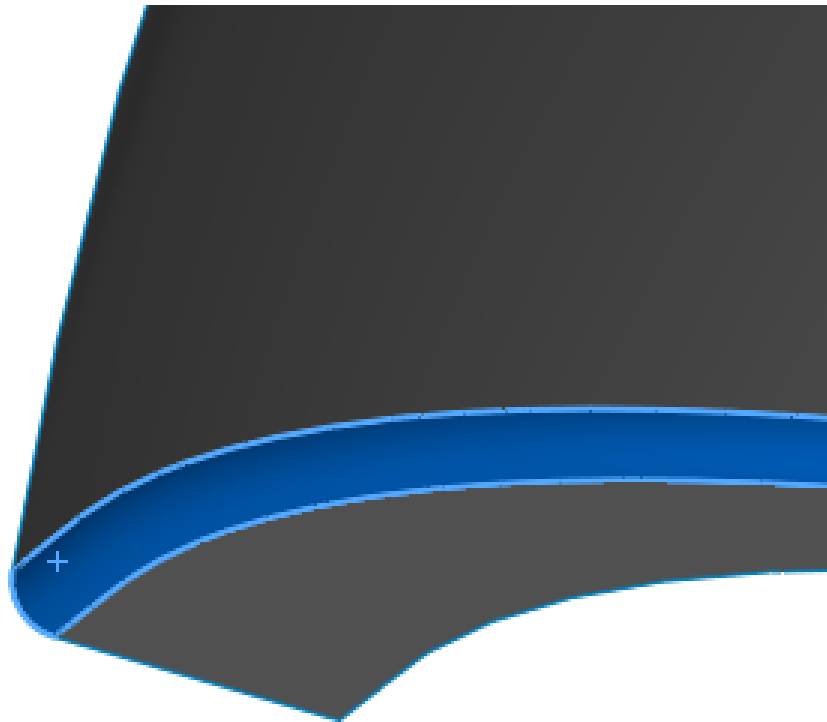


**Figura III.5** Operación rellenar superficie.

Finalmente, se realiza una operación de redondeo con un radio de 3 mm entre las dos superficies curvas (**Figura III.6**), con el fin de evitar posibles aristas vivas que faciliten la concentración de tensiones.

### III. Desarrollo del trabajo

---

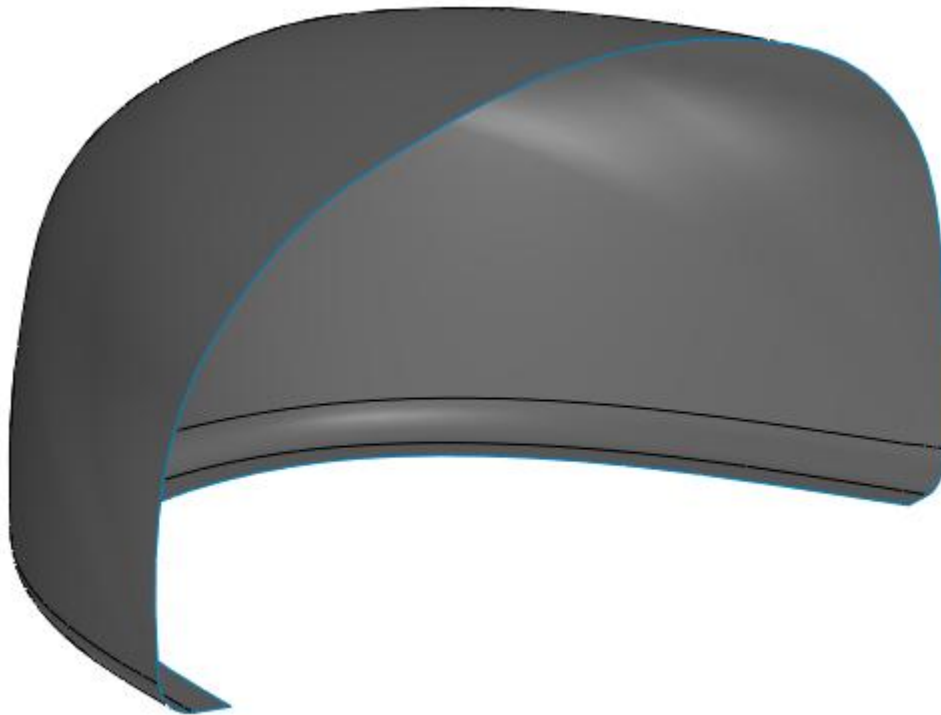


**Figura III.6** Operación de redondeo entre ambas superficies curvas.

De este modo, se obtiene el prototipo para la puntera de seguridad (**Figura III.7**) sobre la cual se realizará la aplicación de materiales seleccionados y se simularán los ensayos que se determinan en la normativa.

### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.7** Diseño final del prototipo de la puntera de seguridad para calzado de seguridad realizado con la herramienta SolidWorks.

## III. Desarrollo del trabajo

---

### III.2 NORMATIVA APLICABLE

Atendiendo a la norma ISO (20345:2011) elaborada por el comité técnico AEN/CTN 81. "Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo" se establecen las condiciones que se deben adoptar tanto de forma europea como nacional en el calzado de seguridad para equipos de protección individual.

En el apartado 5.3.2 Protección de los dedos de la norma ISO (20345:2011) se establece que las punteras de seguridad deben de estar incorporadas en el calzado de tal manera que no puedan ser extraídas sin deteriorar el calzado. Seguidamente, con respecto a los ensayos, las condiciones se establecen en la normativa EN (12568:2010) "Protectores de pies y piernas. Requisitos y métodos de ensayo para topes y plantas resistentes a la perforación" apartado 4 "Requisitos para topes".

#### **Luz libre mínima**

La luz vertical libre mínima es la longitud restante entre la base de la pieza y la cara interna del tope superior de la puntera al producirse una deformación en la pieza. Ésta se determina de modo que los dedos de los pies no se vean afectados debido a la deformación producida por un impacto o por compresión y, además, se pueda facilitar la extracción de los pies de la zona afectada.

La luz libre mínima se determina en función de la talla del zapato y puntera.

**Tabla III.1** Luz vertical libre mínima entre la cara interna del tope superior y la base de la pieza.

Talla del tope	38 e inferiores	39	40-41	42	43	44 y superiores
Luz vertical libre mínima bajo el tope interno (mm)	19,5	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0

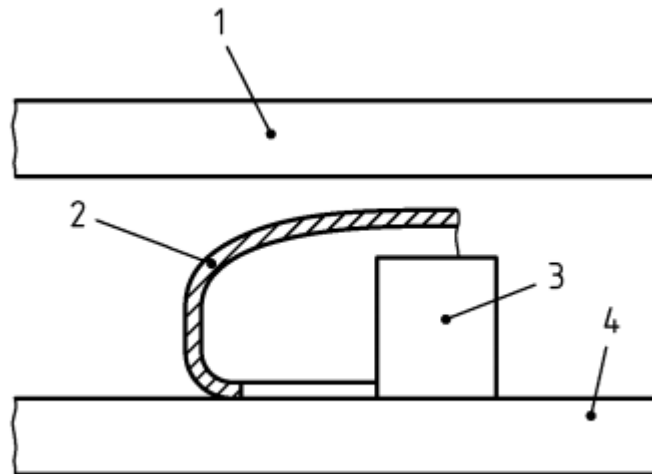
#### **Ensayo a compresión**

Se ensayan las punteras con una carga de compresión de  $(15 \pm 0,15)$  kN aplicada por un plato móvil a una velocidad de  $(5 \pm 2)$  mm/min (**Figura III.8**) y se debe de determinar que la pieza a pesar de que pueda sufrir deformaciones permanentes no

### III. Desarrollo del trabajo

---

rompa ni supere la luz vertical libre mínima atendiendo a la **Tabla III.1**, en este caso al tratarse de una puntera de talla 40, dicha luz vertical libre no debe de superar los 19,5mm.



**Figura III.8** Ensayo a compresión de una puntera de seguridad. 1) Plato superior móvil. 2) Puntera de seguridad. 3) Cilindro de pasta modular para indicar si se cumple la luz libre mínima. 4) Plato inferior fijo o plato de apoyo.

#### **Ensayo a impacto**

Las punteras se ensayan con una energía de impacto de  $(200 \pm 2)$  J y se debe determinar que la luz vertical libre mínima cumpla con los requisitos según la **Tabla III.1**.

Para realizar el impacto, se utiliza un percutor de acero (**Figura III.9**) de  $(20 \pm 0,2)$  kg de masa a una altura de 1,02m de manera que se cumpla con los valores de energía determinados. El percutor es un prisma con dos caras rectangulares con una longitud mínima de 60mm.

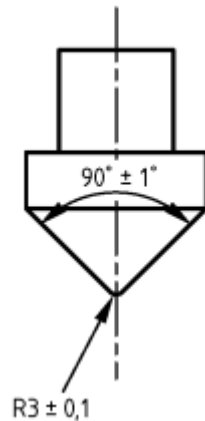


Figura III.9 Esquema del percutor utilizado en ensayos de impacto para punteras.

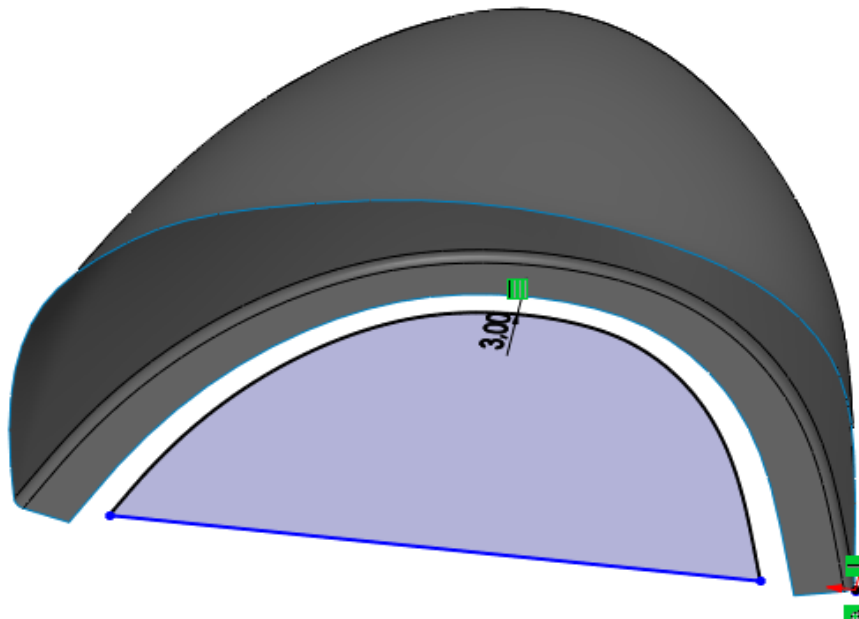
## III.3 ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES

Como bien se indica en la III.2 **NORMATIVA APLICABLE**, la puntera de seguridad será sometida a esfuerzos de compresión y de impacto. Para ello, se debe de establecer dónde serán aplicadas las fuerzas (**Figura III.14**) y se debe de determinar las sujeciones (**Figura III.13**) de esta misma. De modo que se consigan unos datos teóricos lo más fiables posibles a la realidad.

En primer lugar, se establecerá la zona de aplicación de la fuerza para el ensayo por compresión. En el modelo, se genera un croquis con un trazado el cual representa la forma del plato superior (**Figura III.8**) de aplicación de fuerza en el ensayo de compresión. (**Figura III.10**).

### III. Desarrollo del trabajo

---



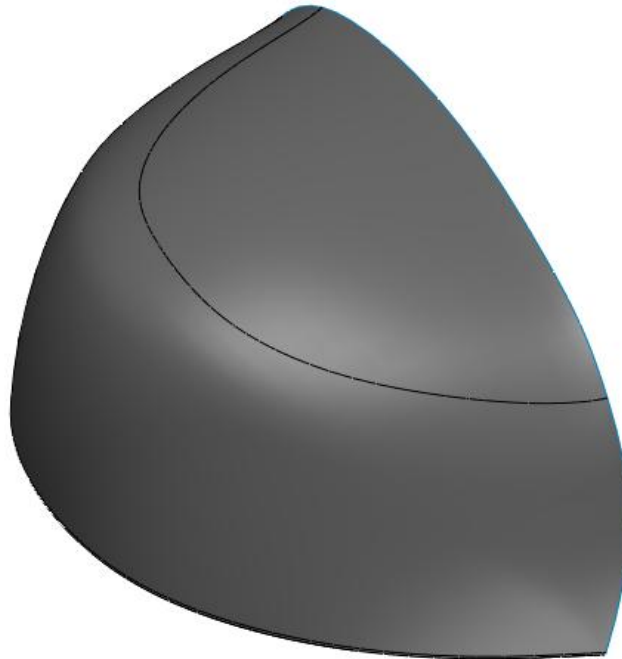
**Figura III.10** Croquis para la proyección de la zona de aplicación de la fuerza.

Por consiguiente, se utiliza el comando línea de partición para poder proyectar el croquis sobre la superficie superior de la puntera y por tanto, quedando definida la zona de aplicación de fuerzas. (**Figura III.11**).



### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.11** Creación de la zona de aplicación de fuerzas a partir de la proyección del croquis.

De esta forma, sobre la superficie definida, se realizará un estudio estático no lineal donde se aplicará una fuerza de compresión de 15 kN. Tras el análisis, para poder trabajar con modelos no lineales se debe dar espesor a la pieza, el espesor introducido es de 3mm (**Figura III.12**) sobre el cual se estudiará el comportamiento de los materiales elegidos en el apartado **III.4 SELECCIÓN DE MATERIALES**.

### III. Desarrollo del trabajo

---

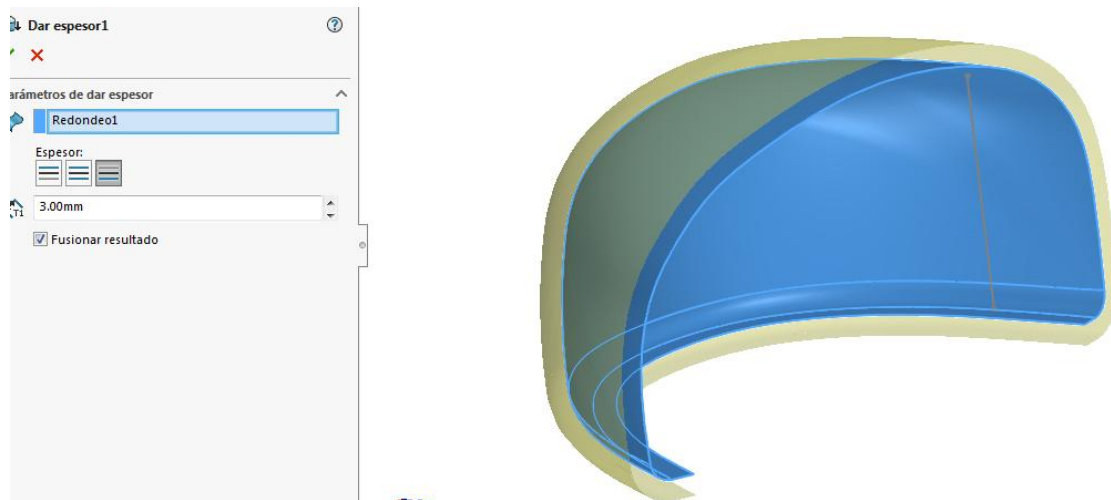


Figura III.12 Operación dar espesor, para un espesor de 3mm.

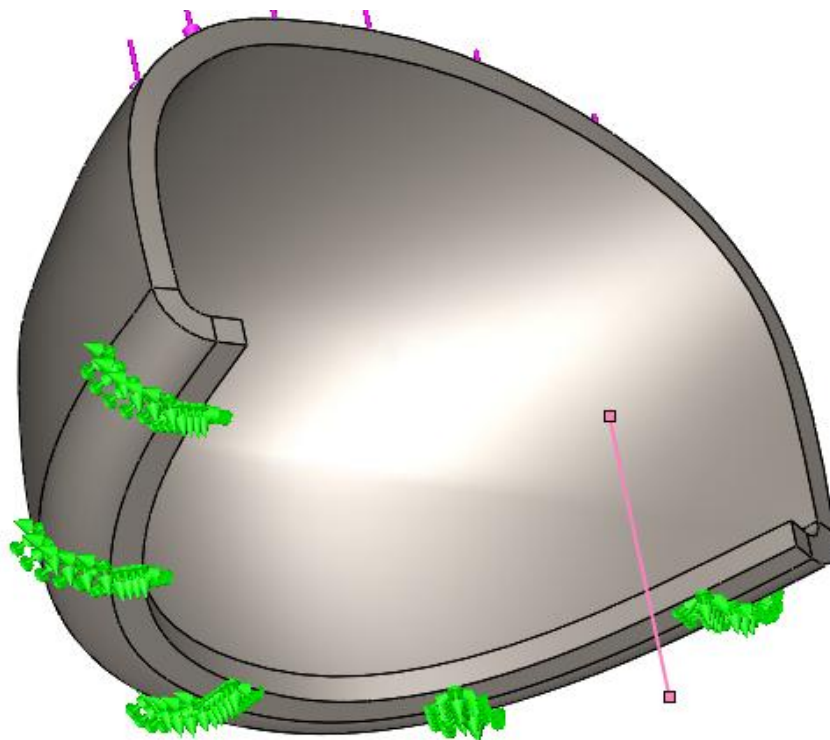
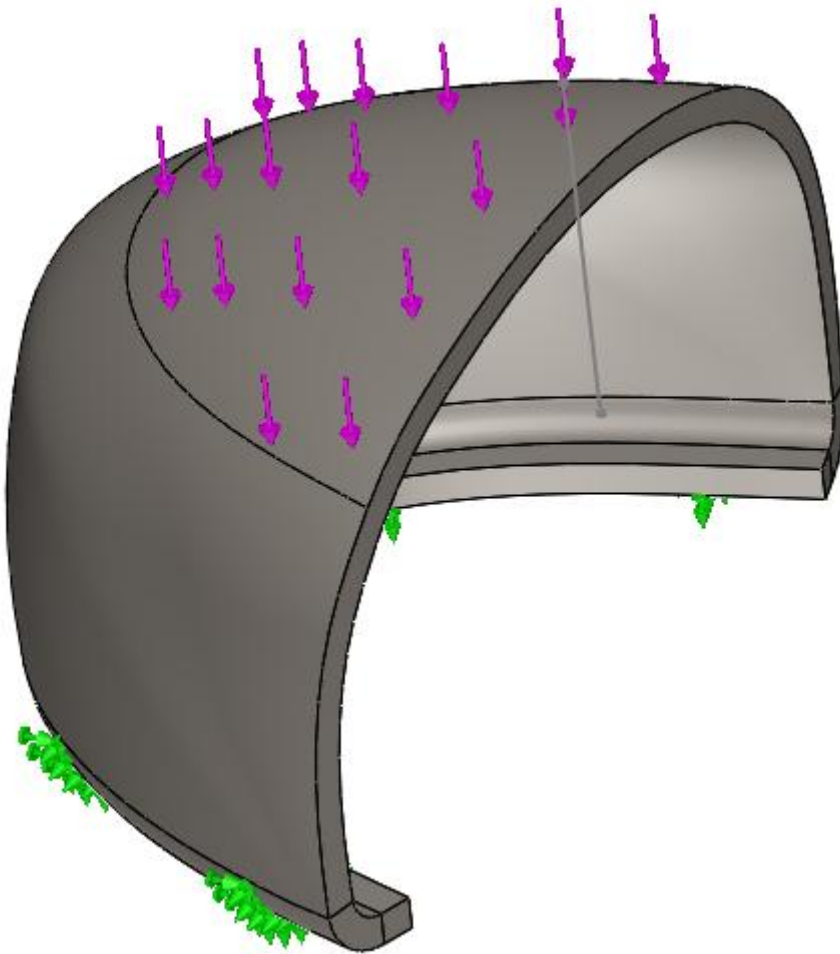


Figura III.13 Restricciones aplicadas sobre la base de la puntera simulando el contacto con el suelo.

### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.14** Aplicación de fuerza de compresión sobre la cara superior de la puntera.

Por otro lado, se debe de aplicar una energía de impacto sobre la puntera de 200 J, para ello se utiliza una masa de 20kg la cual se debe dejar caer a una determinada altura para que su impacto produzca la energía demandada.

Para realizar el ensayo de impacto, se utilizará un estudio estático no lineal en el cual se simulará una nueva zona de aplicación de fuerza correspondiente con la del percutor de impacto. De esta forma, se calculará la fuerza de impacto, la velocidad de impacto y la altura de caída del percutor a partir de una masa de 20kg, una energía de 200 J y tomando como referencia la penetración máxima que se permite en la puntera (19.5mm).

### III. Desarrollo del trabajo

---

El cálculo se realizará mediante la expresión de la energía potencial y por las expresiones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA).

Por tanto, se procede a calcular la altura a la que se debe dejar caer una masa de 20kg para desarrollar una energía de 200 J.

$$E_p = m * g * h$$

$$200 = 20 * 9,81 * h$$

$$h = 1,019m$$

Por consiguiente, con la expresión del MRUA se obtiene la velocidad de impacto.

$$h_f = h_i + v_i * t + \frac{1}{2} * g * t^2$$

$$1,019 = 0 + 0 * t + \frac{1}{2} * 9,81 * t^2$$

$$t = 0,456s$$

$$v_f = v_i + g * t$$

$$v_f = 0 + 9,81 * 0,456$$

$$v_f = 4,47 \text{ m/s}$$

Una vez obtenida la velocidad de impacto, se procede a calcular la fuerza de impacto del percutor a partir del trabajo neto.

$$W_{neto} = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

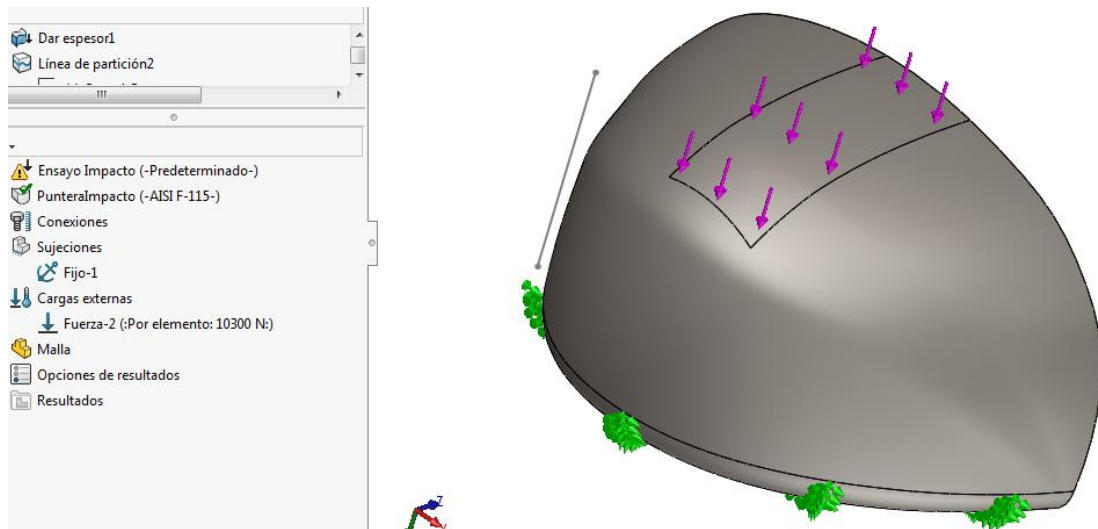
$$W_{neto} = \frac{1}{2} 20 * 4,47^2 = 200 \text{ J}$$

$$F_{impacto} = \frac{W_{neto}}{\text{penetración}} = \frac{200}{0,0195} = 10256N \approx 10,3kN$$

### III. Desarrollo del trabajo

---

Es por ello que, se aplicarán un valor de 10,3kN sobre la superficie limitante creada por el impacto del percutor. En la **Figura III.15** se aprecia la aplicación de dicha fuerza de impacto.



**Figura III.15** Aplicación de fuerza de impacto sobre la superficie de impacto del percutor sobre la puntera.

## III.4 SELECCIÓN DE MATERIALES

En el apartado selección de materiales, se establecen todas las propiedades, tanto mecánicas como elásticas, de los materiales que serán sujetos a estudio para comprobar si son aptos o no en la realización de una puntera de seguridad según sus condiciones de trabajo.

Para ello, se estudiarán desde diseños realizados únicamente con acero o aluminio, hasta diseños avanzados realizados con materiales compuestos tanto en forma de laminados como en forma de compuesto con refuerzo de fibra corta.

Además, se estudiará el comportamiento de los materiales eco-eficientes y se determinará su posibilidad en la fabricación de punteras de seguridad.

Estos valores, serán los que se introducirán en el programa Solid Works para estudiar los estados tensionales y deformaciones que se producen en el diseño a partir de cada material aplicado.

### III.4.1 Acero al carbono F-115 norma UNE

Las propiedades mecánicas del acero F-115 (Tabla III.2) se obtienen de la web Metal Service <sup>10</sup>.

Tabla III.2 Tabla de propiedades mecánicas del acero al carbono F-115

Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Límite elástico	755 MPa
Carga de rotura a tracción	840 MPa
Módulo elástico	205 GPa
Módulo de cortadura	80 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29

### III. Desarrollo del trabajo

---

#### III.4.2 Aluminio 3.4370 norma DIN 1725

La tabla de propiedades mecánicas (Tabla III.3) se obtiene de la lista de aluminios que ofrece Thyssen Krupp Materials Ibérica <sup>12</sup>.

Tabla III.3 Propiedades mecánicas del Aluminio 3.4370 norma DIN 1725

Densidad	2,82 g/cm <sup>3</sup>
Módulo Elástico	72 GPa
Módulo de Cortadura	28 GPa
Módulo de compresibilidad	72 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Carga de rotura a la tracción	550 MPa
Carga de rotura a la compresión	385 MPa
Límite elástico	510 MPa

#### III.4.3 Resina Epoxy RESOLTECH 1070 ECO 37% contenido Bio

Propiedades (Tabla III.4) obtenidas de la página web Castro Composites Shop

<sup>23</sup>.

### III. Desarrollo del trabajo

---

**Tabla III.4** Propiedades mecánicas de la resina epoxy RESOLTECH 1070 para el estudio de un material compuesto tomando ésta como matriz

<b>Em</b>	3,55 GPa
<b>Vm</b>	0.35
<b>Gm</b>	1,31 GPa
<b>Xtm</b>	55 MPa
<b>Xcm</b>	103 MPa
<b>Sm</b>	55 MPa
<b>pm</b>	1,2 g/cm <sup>3</sup>

#### III.4.4 Bio Poliamida 10-10 NP DU 102 de NaturePlast

Las propiedades mecánicas de la bioPA 10-10 **Tabla III.5** se obtienen de la web de NaturePlast <sup>22</sup>.

**Tabla III.5** Propiedades mecánicas poliamida 10-10 NP DU 102 de Nature Plast

Módulo de Young	1,7 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo de cortadura	653,85
Densidad	1,07 g/cm <sup>3</sup>
Carga de rotura a la tracción	83 MPa
Límite elástico	60 MPa



### III. Desarrollo del trabajo

---

#### III.4.5 Ácido Poliláctico

Estos valores **Tabla III.6** se consiguen de la hoja técnica de INGENIO Biopolymer 2003D un tipo de PLA producido por NatureWorks <sup>22</sup>.

**Tabla III.6** Tabla de propiedades resistentes y elásticas del PLA INGENIO biopolymer 2003D.

Módulo elástico	3,5 GPa
Coefficiente de Poisson	0,39
Densidad de masa	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Carga de rotura a la tracción	60 MPa
Límite elástico	53 MPa
Módulo cortante	1,25 GPa

#### III.4.6 Fibras de refuerzo

Para la obtención de todas las propiedades mecánicas de las fibras **Tabla III.7** tanto en la dirección longitudinal como transversal, se consulta la información en diversas webs y se complementa con los valores típicos que se facilitan en el software CesEduPack <sup>6 8</sup>.

### III. Desarrollo del trabajo

---

**Tabla III.7** Propiedades resistentes y elásticas medias de las fibras de carbono de alto módulo, fibras de vidrio, fibras de lino, fibras de yute y fibras de basalto.

Fibra	CF (HM)	GF	Lino	Yute	Basalto
$E_L$ (MPa)	379212	86000	50000	20000	87000
$E_T$ (MPa)	69000	28667	16667	10000	29000
$\nu_{xy}$	0,2	0,22	0,35	0,35	0,28
$\nu_{yz}$	0,25	0,26	0,37	0,38	0,28
$G_{LF}$ (MPa)	75842	33000	15400	8000	33383
$G_{TF}$ (MPa)	48263	21000	9800	4000	18546,5
$X_{TF}$ (MPa)	2500	2000	845	585	3000
$X_{CF}$ (MPa)	1500	1000	469	325	1667
$\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	2,5	1,48	1,4	2,67

#### III.4.7 Cálculo de las propiedades de los materiales compuestos

En el apartado Materiales compuestos, éstos se definen como aquellos materiales formados por una matriz la cual es reforzada con fibras de refuerzo embebidas dentro de ésta, para obtener un material cuyas propiedades mecánicas son muy superiores a la de sus elementos por separado.

Por consiguiente, se procede a realizar el cálculo utilizando el modelo micromecánico de Chamis <sup>8</sup> en el cual se estudian las propiedades resultantes de realizar distintas configuraciones entre matrices y refuerzos para compuestos laminados. Estos materiales presentan un comportamiento ortotrópico, es decir, su comportamiento varía en función del eje de estudio (x, y, z) debido a la orientación de las fibras.

### III. Desarrollo del trabajo

---

Por otra parte, para realizar el estudio de materiales compuestos con refuerzos de fibra corta, se utilizará el modelo micromecánico de retraso en el corte de Cox<sup>30</sup>. Al tratarse de fibra corta, se dispersa de forma aleatoria, lo que permite que el material compuesto presente un comportamiento isotrópico.

Una vez obtenidos varios materiales compuestos, se elegirán para el estudio aquellos cuyas prestaciones se adapten de mejor manera al proyecto.

Las configuraciones que se proponen son las siguientes:

#### Propuestas con matriz termoestable y refuerzo en forma de tejido

- Resina EP RESOLTECH + Fibra de carbono 60%
- Resina EP RESOLTECH + Fibra de vidrio 60%
- Resina EP RESOLTECH + Fibra de lino 60%
- Resina EP RESOLTECH + Fibra de yute 60%
- Resina EP RESOLTECH + Fibra de basalto 60%

Los cálculos realizados se pueden observar en la **Tabla III.8** y **Tabla III.9**.

#### Propuestas con matriz termoplástica y refuerzo en forma de fibra corta

- bioPA 10-10 + Fibra de basalto 60%
- PLA + Fibra de basalto 60%

Los cálculos realizados se representan en la **Tabla III.10**.

### III. Desarrollo del trabajo

Tabla III.8 Propiedades elásticas calculadas con el modelo micromecánico de Chamis de las combinaciones resina epoxy con fibras de refuerzo en formato tejido unidireccional.

Constantes elásticas	EP+ CF	EP+ GF	EP+ Lino	EP+ Yute	EP+ Basalto	
$E_x = E_{Lf} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)$	228947	53020	31420	13420	53620	MPa
$E_y = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot (1 - \frac{E_m}{E_{Tf}})}$	13383	11048	9093	7095	11086	MPa
$E_z = E_y$	13383	11048	9093	7095	11086	MPa
$G_{xy} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot (1 - \frac{G_m}{G_{LTf}})}$	5505	5131	4510	3728	5138	MPa
$G_{xz} = G_{xy}$	5505	5131	4510	3728	5138	MPa
$G_{yz} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot (1 - \frac{G_m}{G_{LTf}})}$	5334	4800	3992	2739	4690	MPa
$\nu_{xy} = \nu_{LTf} \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f)$	0,26	0,27	0,35	0,35	0,31	-
$\nu_{xz} = \nu_{xy}$	0,26	0,27	0,35	0,35	0,31	-
$\nu_{yz} = \frac{E_y}{2G_{yz}} - 1$	0,25	0,15	0,14	0,25	0,18	-

### III. Desarrollo del trabajo

**Tabla III.9** Propiedades resistentes calculadas con el modelo micromecánico de Chamis de las combinaciones resina epoxy con fibras de refuerzo en formato tejido unidireccional.

Constantes resistentes	EP+ CF	EP+ GF	EP+ Lino	EP+ Yute	EP+ Basalto	
$X_t = V_f \cdot X_{tf}$	1500	1200	507	351	1800	MPa
$Y_t = X_{tm} \cdot [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot (1 - \frac{E_m}{E_{Tf}})]$	46	47	47	49	47	MPa
$X_c = V_f \cdot X_{cf}$	900	600	281	195	1000	MPa
$Y_c = X_{cm} \cdot [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot (1 - \frac{E_m}{E_{Tf}})]$	86	87	89	91	87	MPa
$S_{xy} = S_m \cdot [1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \cdot (1 - \frac{G_m}{G_{LTf}})]$	46	46	46	47	46	MPa
$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f)$	1,56	1,98	1,37	1,32	2,08	g/cm <sup>3</sup>
$L_e = 0,5 \cdot X_t$	750	600	253,5	175,5	900	MPa

### III. Desarrollo del trabajo

**Tabla III.10** Propiedades mecánicas calculadas con el modelo micromecánico de retraso en el corte de Cox de las combinaciones resina bioPA o PLA con fibras de refuerzo en formato tejido fibra corta.

Propiedades mecánicas	bioPA+Basalto	PLA+Basalto	
$E = E_f \left( 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\eta L}{2}\right)}{\frac{\eta L}{2}} \right) V_f + E_m V_m$	38184	42992,87	MPa
$X_t = X_{tf} \left( 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\eta L}{2}\right)}{\frac{\eta L}{2}} \right) V_f + X_{tm} V_m$	1326,4	1458,2	MPa
$\eta = \frac{1}{r} \left( \frac{2E_m}{E_f(1 + \nu_m) \ln\left(\frac{\pi}{V_f}\right)} \right)^{\frac{1}{2}}$	7,09	9,84	-
$G = 0,1E$	3818,4	4299,3	MPa
$\nu = \nu_{LTF} \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f)$	0,288	0,324	-
$L_e = 0,5X_t$	663,2	729,1	MPa
$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f)$	2,03	2,10	g/cm <sup>3</sup>

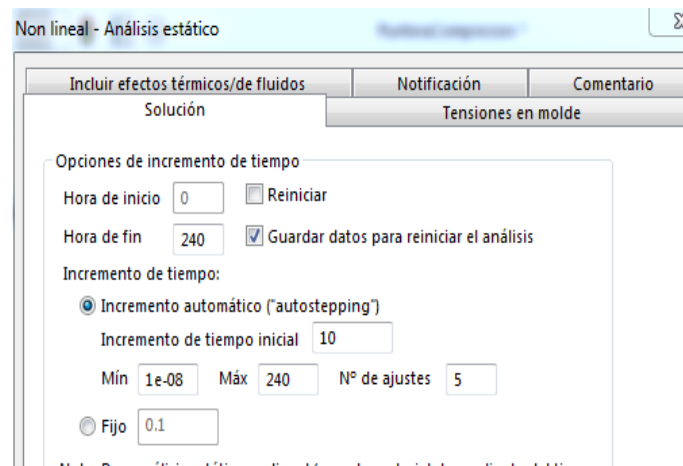
Para el cálculo de la **Tabla III.10** se toman los siguientes valores para las fibras en formato fibra corta:

- $r=0,019\text{mm}$
- $L=1\text{mm}$

# III.5 SIMULACIÓN MEDIANTE FEM

## III.5.1 Modelo FEM proyecto

Para la realización del estudio del modelo FEM se seleccionará un estudio del tipo no lineal estático. Esto se debe a que, en el caso del ensayo a compresión, la aplicación de la fuerza no es instantánea si no que se aplica a una velocidad de 5mm/min, es decir el ensayo se realizará durante 240 segundos. En la **Figura III.16** y **Figura III.17** se introduce en SolidWorks una fuerza de 15000 N aplicada de forma lineal en función del tiempo.



**Figura III.16** Aplicación del tiempo de realización de ensayo.

### III. Desarrollo del trabajo

---

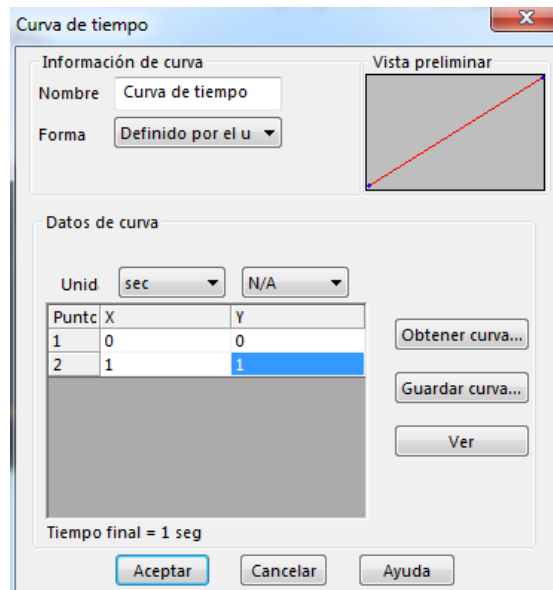


Figura III.17 Aplicación de la fuerza de forma lineal en función del tiempo establecido.

A su vez, para la realización de un estudio no lineal, la pieza debe de presentar un espesor previamente definido. En el caso de la puntera, se estudiará un espesor de 3mm sobre el cual se comprobará cómo se comportan los materiales seleccionados. Para el caso de los materiales compuestos laminados, se considera un espesor de 0,375mm por lámina y se formarán laminados siguiendo la siguiente orientación [0, 45, 90, -45]s.



## III. Desarrollo del trabajo

---

### III.5.1.1 Aplicación del modelo de plasticidad Von Mises

En SolidWorks se pueden aplicar varios tipos de modelos para la realización del cálculo tensiones-deformaciones. En este caso, en las punteras de seguridad atendiendo a la **III.2 NORMATIVA APLICABLE** se pueden dar deformaciones permanentes, es decir, el diseño puede estar sometido a un entorno donde el material trabaje en su zona plástica, siempre y cuando no se supere la luz libre mínima.

Esto quiere decir que, el modelo de cálculo isotrópico no es el adecuado ya que a partir del límite elástico de los materiales introducidos el programa, considera que su módulo de Young sigue comportándose de forma lineal lo que conlleva con una desviación en los resultados frente al comportamiento en la realidad <sup>31</sup>.

Para ello, se utilizará el modelo de plasticidad Von Mises en el cual se determina un módulo de Young tangente sobre el cual el programa realizará el cálculo una vez superada la zona elástica del material introducido. Este módulo tangente no es más que una aproximación al comportamiento del material a la realidad.

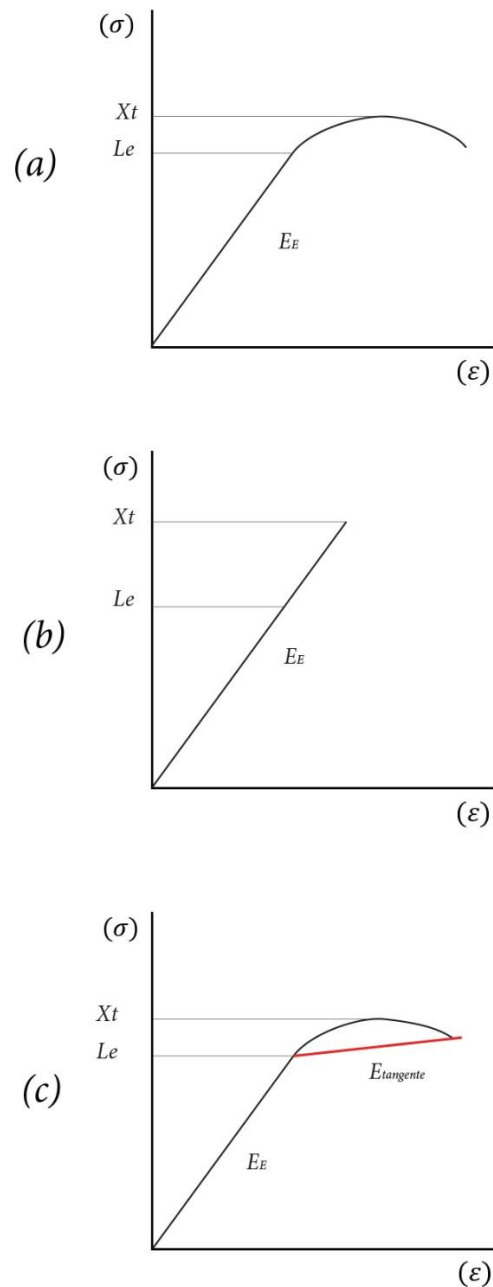
Atendiendo a la **Figura III.18** se puede comprobar como el trazado del módulo tangente consigue una mejor aproximación al comportamiento en la realidad que el modelo isotrópico.

Para determinar el módulo tangente de los materiales que se introducirán posteriormente, se considerará como el 10% de su módulo de Young.

$$E_{tangente} = 0,1E_{elástico}$$

### III. Desarrollo del trabajo

---



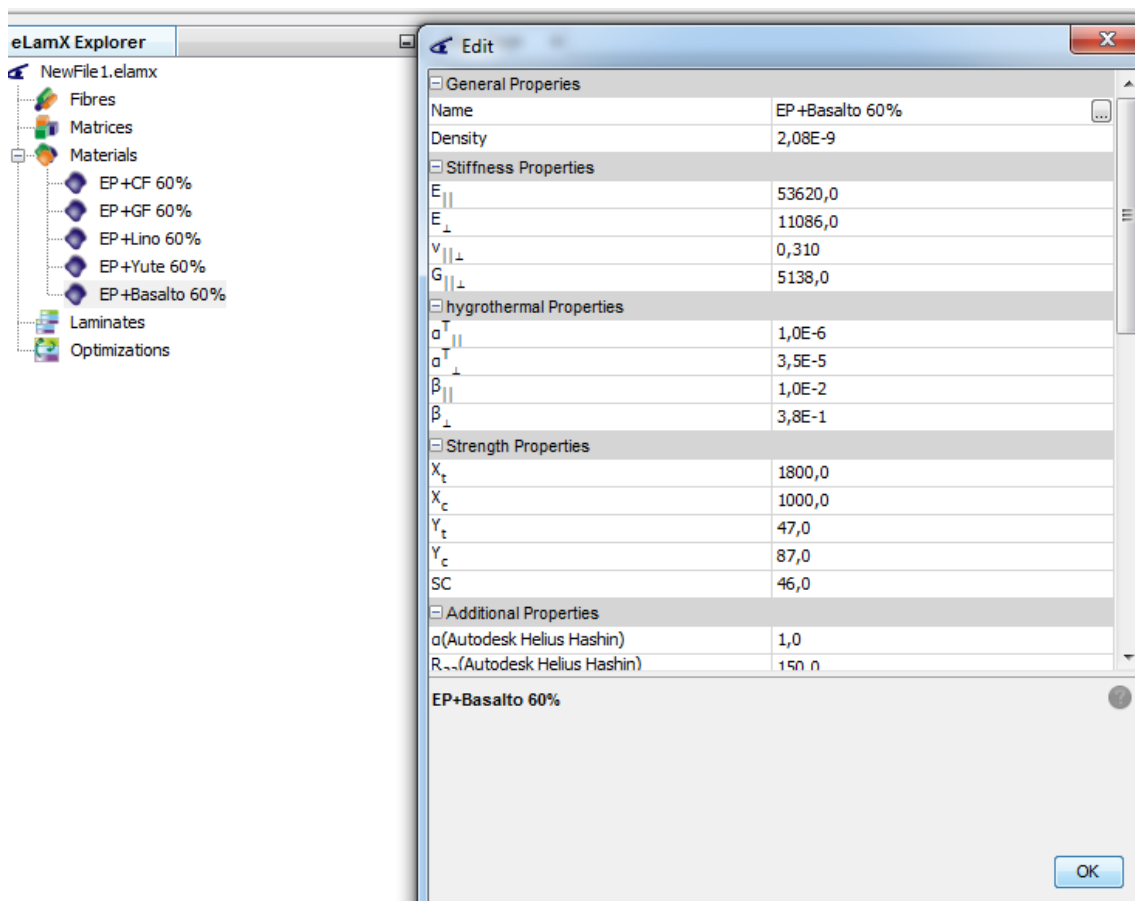
**Figura III.18** Modelos de cálculo FEM en SolidWorks frente al comportamiento de los materiales. (a) Gráfica tensión-deformación del comportamiento de los materiales en la realidad. (b) Modelo de cálculo isotrópico en SolidWorks. (c) Modelo de cálculo de plasticidad Von Mises en Solid Works.

### III. Desarrollo del trabajo

#### III.5.1.2 Aplicación de materiales

En un estudio no lineal, SolidWorks no permite aplicar los materiales laminados en forma de láminas con espesor y orientación propios. Esto implica que, se utilizará el software de cálculo eLamx versión 2.0 para poder obtener las propiedades mecánicas del laminado a partir de las propiedades de las láminas calculadas por el modelo micromecánico de Chamis y poder introducirlos en SolidWorks para el análisis de estados tensionales.

En la **Figura III.19** se aprecia la introducción de las prestaciones del laminado EP+Basalto 60% calculado en la **Tabla III.9**. (Se utiliza este material como ejemplo de la metodología seguida en el programa)



**Figura III.19** Introducción de las propiedades resistentes y elásticas de los laminados calculados por el modelo micromecánico de Chamis en el software de cálculo eLamx 2.0.

### III. Desarrollo del trabajo

Seguidamente, como se puede ver en la **Figura III.20** a partir del material introducido en el apartado de materiales, se construye un laminado cuya orientación es  $[0, 45, 90, -45]_s$  y su espesor de lámina 0,375mm. De esta misma manera, se crean el resto de laminados siguiendo la misma orientación.

...	Name	Angle	Thickness	Material	Failure Criterion
1	EP+CF 60%	0,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
2	EP+CF 60%	45,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
3	EP+CF 60%	90,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
4	EP+CF 60%	-45,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
5	EP+CF 60%	-45,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
6	EP+CF 60%	90,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
7	EP+CF 60%	45,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill
8	EP+CF 60%	0,0	0,375	Ep+CF 60%	Tsai-Hill

**Figura III.20** Creación de laminado EP+CF 60% siguiendo la siguiente orientación  $[0, 45, 90, -45]_s$ .

Finalmente, con los laminados creados, se realiza el cálculo de propiedades mecánicas las cuales se introducirán de la misma manera que se realizará con el resto de materiales seleccionados. (**Tabla III.11**).

En la **Figura III.21**, se aprecia la obtención de los resultados para el laminado EP+CF 60%. (Ejemplo de la obtención de los resultados de uno de los materiales a estudiar).

		without Poisson		with Poisson	
		Membrane	Flexural	Membrane	Flexural
$E_x$	=	94860,1	155627,9	85195,2	143013,6
$E_y$	=	94860,1	54181,5	85195,2	43107,8
$G_{xy}$	=	32290,6	22246,0	32290,6	17358,4
$\nu_{xy}$	=	-	-	0,319	0,224
$\nu_{yx}$	=	-	-	0,319	0,068
$t_{tot}$	=		3,0		
Area Weight	=		4,68E-9		

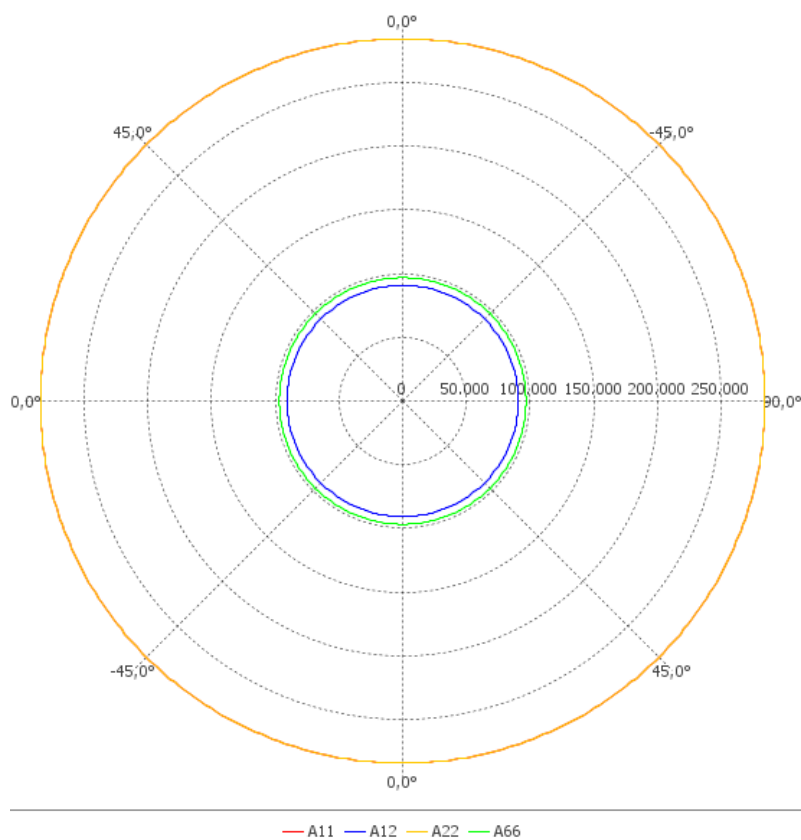
**Figura III.21** Obtención de las propiedades mecánicas de los laminados a partir del material introducido, orientación y espesor.

### III. Desarrollo del trabajo

---

Realizando el proceso efectuado en el programa eLamx2, se consiguen laminados compuestos cuyo comportamiento es cuasi-isotrópico, esto se puede comprobar en la **Figura III.21** ya que las propiedades obtenidas tanto para el módulo elástico longitudinal como transversal y en los coeficientes de poisson, son iguales.

Por otra parte, el software permite comprobar la isotropía del laminado mediante el comando gráfico polar, en la **Figura III.22** se representa el gráfico polar del laminado compuesto por EP+CF 60% como ejemplo.



**Figura III.22** Gráfico polar del laminado compuesto por EP+CF 60%

En los gráficos polares, se representan los valores de la matriz extensional [A] la cual determina las propiedades del laminado en función de la orientación las láminas que lo conforman. De este modo, si en el gráfico polar se obtienen los mismos valores

### III. Desarrollo del trabajo

---

para todos los ángulos definidos, se obtiene un laminado con un comportamiento cuasi-isotrópico.

La matriz extensional  $[A]$  del laminado es equivalente a la matriz de rigidez  $[Q]$  de la lámina en ausencia de momentos en su estudio. Cabe destacar, que la matriz de rigidez no es más que la inversa de la matriz de flexibilidad  $[S]$  de una de las láminas que conforman el diseño.

$$[Q] = [S]^{-1}$$
$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$
$$[Q] = \begin{bmatrix} E_1 & \frac{-E_2}{\nu_{21}} & 0 \\ \frac{-E_1}{\nu_{12}} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}$$

Como se ha dicho, en ausencia de momentos,  $[Q]$  equivale a  $[A]$ , por tanto:

$$[Q] = [A]$$
$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$$
$$[A] = \begin{bmatrix} E_1 & \frac{-E_2}{\nu_{21}} & 0 \\ \frac{-E_1}{\nu_{12}} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}$$

De esta forma, volviendo a la **Figura III.22** se comprueba como los elementos  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{22}$  y  $A_{66}$  se corresponden con los valores de  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$  y  $G_{12}$ . Y, por

### III. Desarrollo del trabajo

tanto, como los resultados son iguales para todas las orientaciones presentadas, se obtienen materiales cuasi-isotrópicos.

Para comprobar que el gráfico polar representa los datos correctamente, en la matriz [ABBD] obtenida del laminado en el programa (**Figura III.23**) se comprueba como efectivamente que los módulos elásticos son iguales en ambas direcciones, así como el módulo de poisson.

284580,3	90836,9	0,0	-0,0	-0,0	0,0
90836,9	284580,3	0,0	-0,0	-0,0	0,0
0,0	0,0	96871,7	0,0	0,0	0,0
-0,0	-0,0	0,0	350162,9	45527,3	34238,2
-0,0	-0,0	0,0	45527,3	121908,3	34238,2
0,0	0,0	0,0	34238,2	34238,2	50053,5

**Figura III.23** Matriz [ABBD] del laminado EP+CF 60%

**Tabla III.11** Resultados de las propiedades mecánicas de los laminados obtenidos en eLamx2.

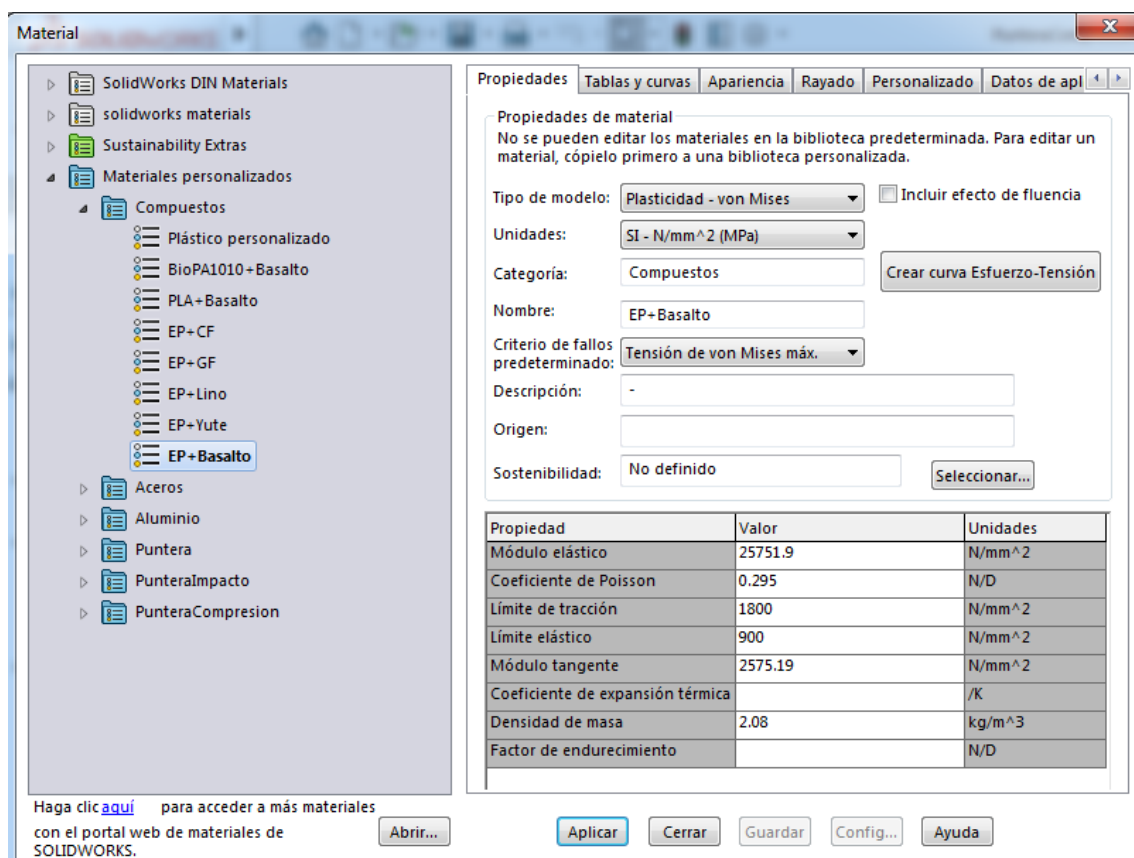
Propiedades	EP+CF	EP+GF	EP+Lino	EP+Yute	EP+Basalto	Unidades
$E_x = E_y$	85195,2	25502,3	17274,8	9988,0	25751,9	MPa
$G_{xy}$	32290,6	9940,3	6692,8	3942,2	9944,6	MPa
$\nu_{xy} = \nu_{yx}$	0,319	0,283	0,291	0,267	0,295	-
$\rho$	1,56	1,98	1,37	1,32	2,08	g/cm <sup>3</sup>
$X_t$	1500	1200	507	351	1800	MPa
$X_c$	900	600	281	195	1000	MPa
$L_e$	750,0	600,0	253,5	175,5	900,0	MPa

Con los datos obtenidos a partir de las hojas técnicas, modelos de cálculo y de los cálculos de los laminados, se procede a realizar la introducción de éstos en la biblioteca de materiales de SolidWorks.

### III. Desarrollo del trabajo

Una vez dentro de SolidWorks, se selecciona el apartado especificar material y se accede a la biblioteca de materiales. Dentro de ésta, aparecen varios materiales por defecto, sin embargo, se procede a la creación de nuevos materiales con las propiedades calculadas.

En la **Figura III.24** se comprueba cómo han sido introducidos todos los materiales tanto compuestos como isotrópicos a partir de las propiedades mecánicas y del modelo de plasticidad de Von Mises.



**Figura III.24** Introducción y creación del laminado EP+Basalto 60% a partir de sus propiedades mecánicas y utilizando para el cálculo el modelo de Plasticidad de Von Mises.

### III.5.2 Análisis de estados tensionales y deformaciones

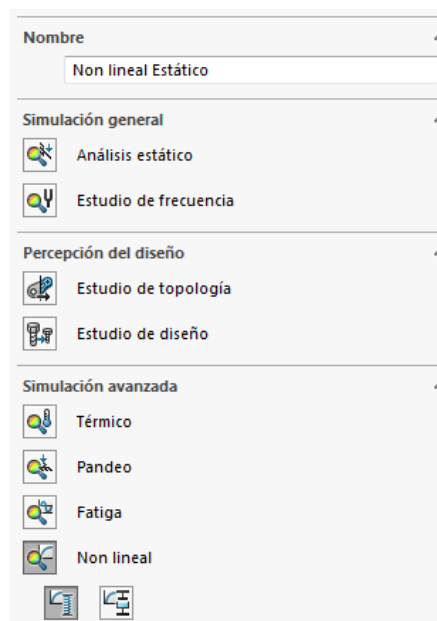


### III. Desarrollo del trabajo

---

Para la realización tanto del ensayo a compresión como el de impacto, se realiza un estudio no lineal estático. Este estudio, consiste en la aplicación de la fuerza de impacto 10,3 kN y de la fuerza de compresión 15 kN sobre un área determinada por el tipo de ensayo realizado.

En la **Figura III.25** se puede ver como se ejecuta un nuevo estudio no lineal estático, el cual servirá tanto para el ensayo a compresión como el de impacto.

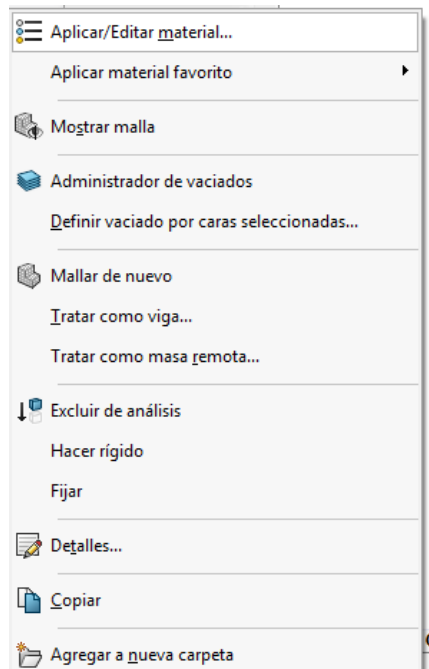


**Figura III.25** Creación de análisis estático no lineal para la realización de un cálculo mediante modelo FEM.

Una vez creado un nuevo estudio, se introduce el material a estudiar mediante el comando aplicar/editar material según se puede apreciar en la **Figura III.26**.

### III. Desarrollo del trabajo

---



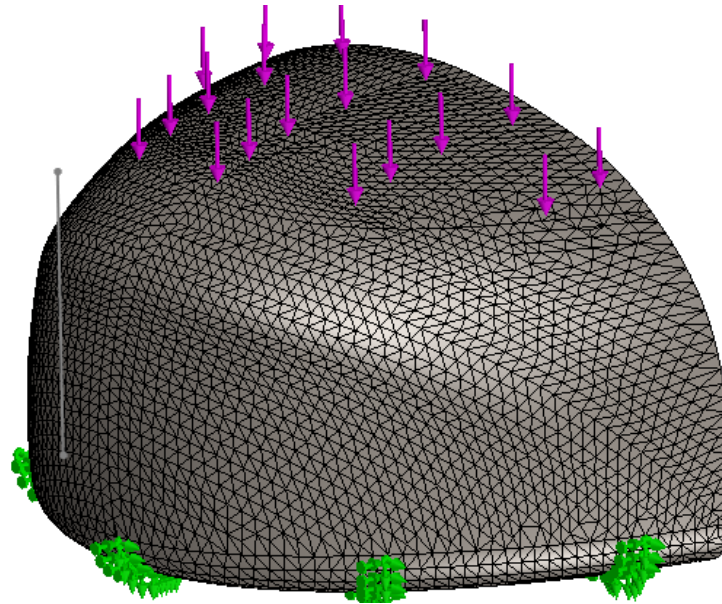
**Figura III.26** Selección de material para el estudio no lineal estático del modelo FEM.

Seguidamente, se realiza un mallado cuya densidad sea fina ya que, debido a la sencillez en la forma geométrica de la pieza, el programa podrá realizar los cálculos de manera más rápida. En el mallado, se divide la pieza en pequeños segmentos formados por nodos los cuales son mayores o menores en función de la densidad de mallado.

En la **Figura III.27** se ha creado el mallado de la pieza sujeta a las condiciones del ensayo a compresión.

### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.27** Mallado de la pieza para el ensayo a compresión con una densidad de malla muy fina para la realización del cálculo.

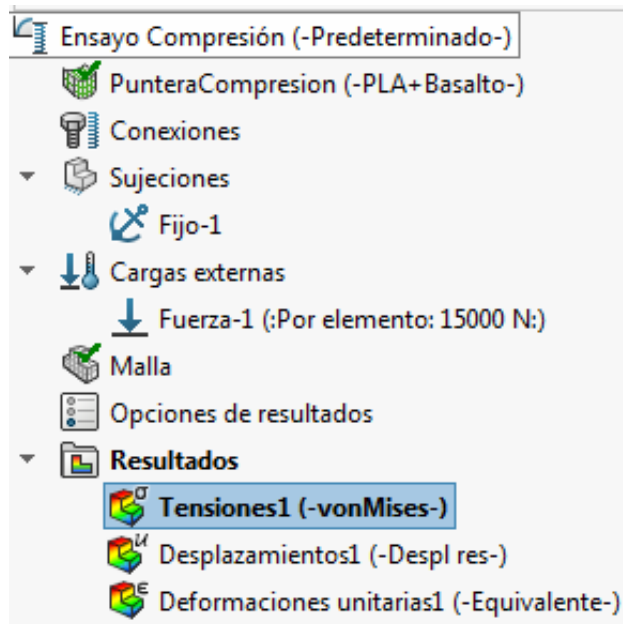
#### III.5.2.1 Ensayo a compresión

Una vez se han introducido el material, las sujeciones, la aplicación de la fuerza y el mallado en el diseño, se procede a ejecutar el cálculo estático no lineal.

En la representación de los estados tensionales, desplazamientos y deformaciones unitarias (**Figura III.28**), se representarán los puntos más desfavorables para poder estudiar opciones para un rediseño en el prototipo inicial.

### III. Desarrollo del trabajo

---



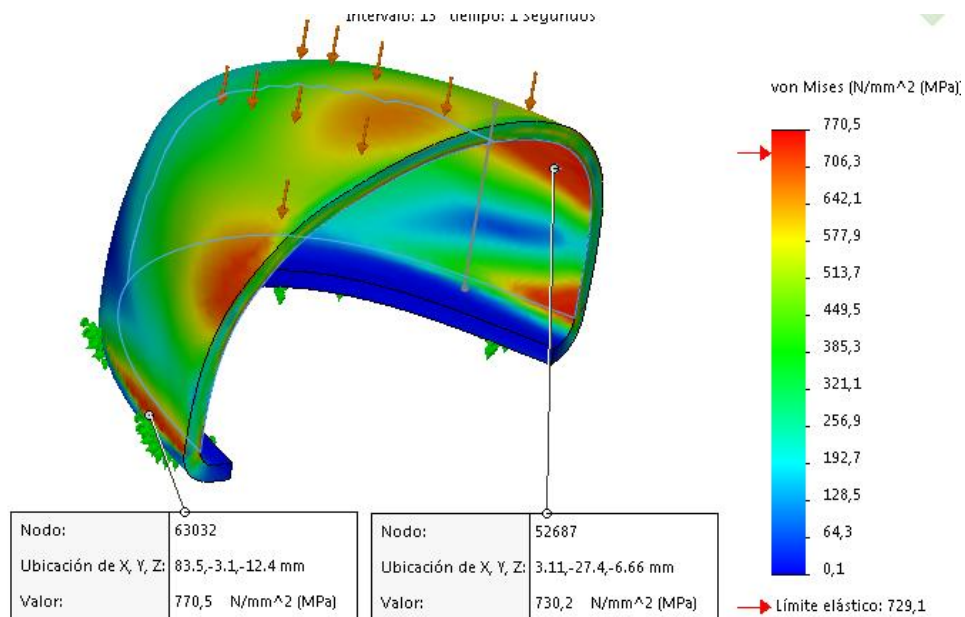
**Figura III.28** Selección del tipo de resultados en el ensayo a compresión a partir de las condiciones determinadas para el estudio de una puntera de seguridad fabricada con PLA+Basalto 60%.

El formato de representación de datos consta de una imagen con la figura deformada tras la aplicación de una carga progresiva de 15 kN cuya duración es de 240 segundos, además, se facilita una leyenda donde se identificarán aquellos puntos donde la tensión sea máxima o incluso se haya superado el límite elástico o la rotura.

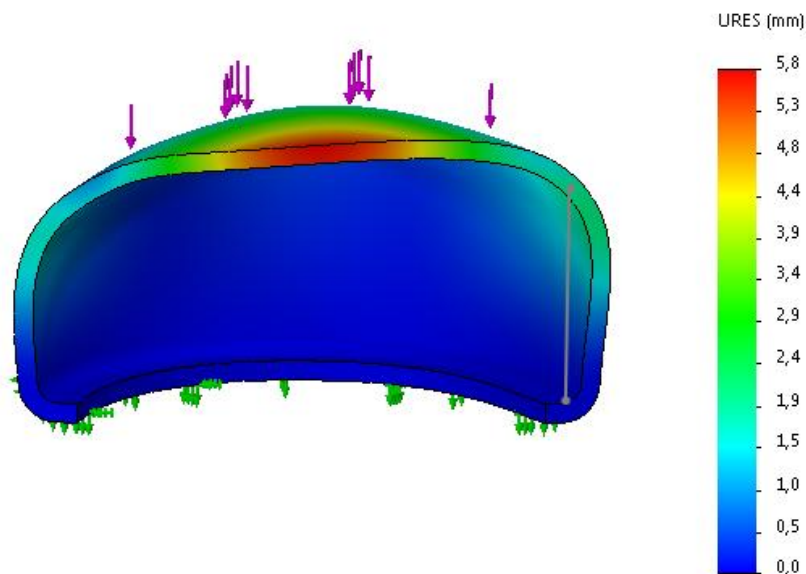
A continuación en la **Figura III.29**, **Figura III.30** y **Figura III.31** se realiza el cálculo no lineal estático para uno de los materiales a estudiar. En este caso es el del PLA+Basalto con un volumen de fibra al 60%.

Finalmente, una vez se realice todos los estudios en los materiales seleccionados, se creará una tabla donde se podrán comparar todos los resultados tanto del ensayo a compresión como del ensayo a impacto. De esta manera, se decidirá la viabilidad de la aplicación de los materiales eco-eficientes en punteras de protección para calzado de seguridad.

### III. Desarrollo del trabajo



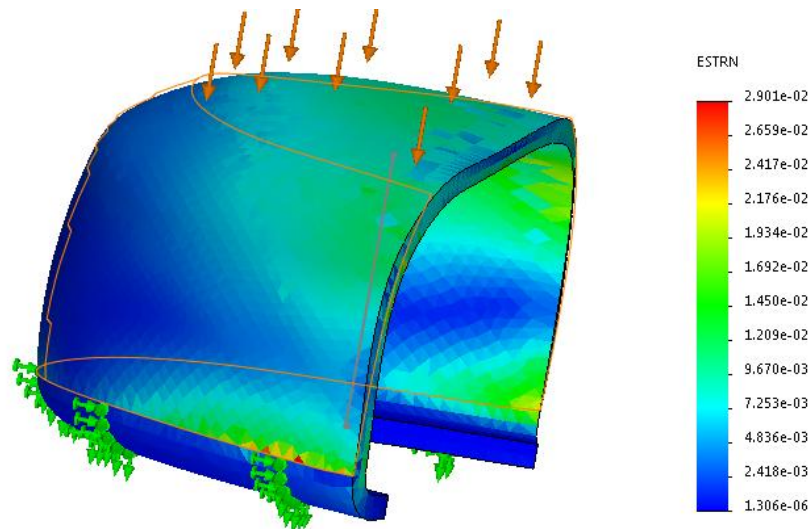
**Figura III.29** Estados tensionales en la puntera de seguridad para un espesor de 3mm y PLA+Basalto 60% utilizado como material.



**Figura III.30** Desplazamientos obtenidos en la realización del ensayo a compresión utilizando PLA+Basalto 60% como material.

### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.31** Deformaciones unitarias obtenidas en el ensayo de compresión utilizando PLA+Basalto 60% como material.

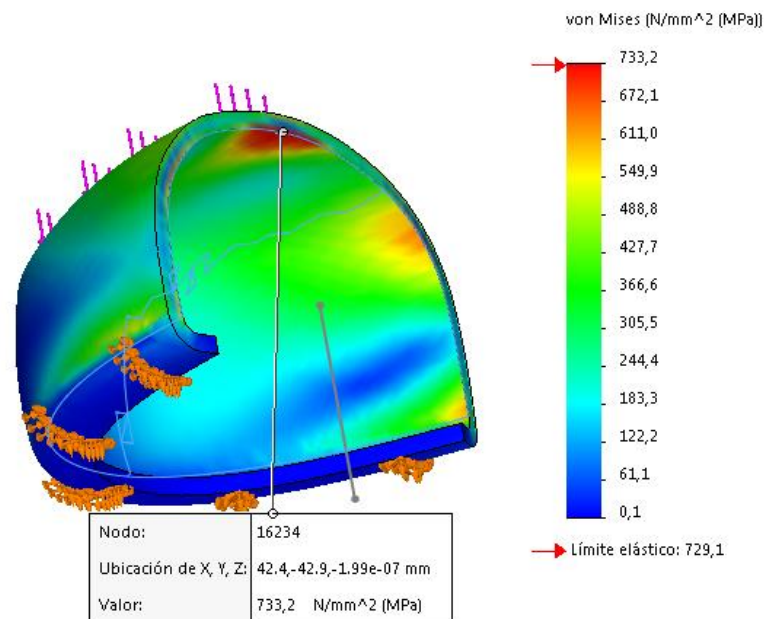
#### III.5.2.2 Ensayo a impacto

Para la realización del ensayo a impacto, se aplica una carga de 10,3 kN sobre el área de aplicación de fuerzas que el percutor de impacto traza sobre la puntera. A diferencia del ensayo a compresión, la carga es aplicada de forma inmediata lo que implica un mayor desarrollo de tensiones en la zona de aplicación.

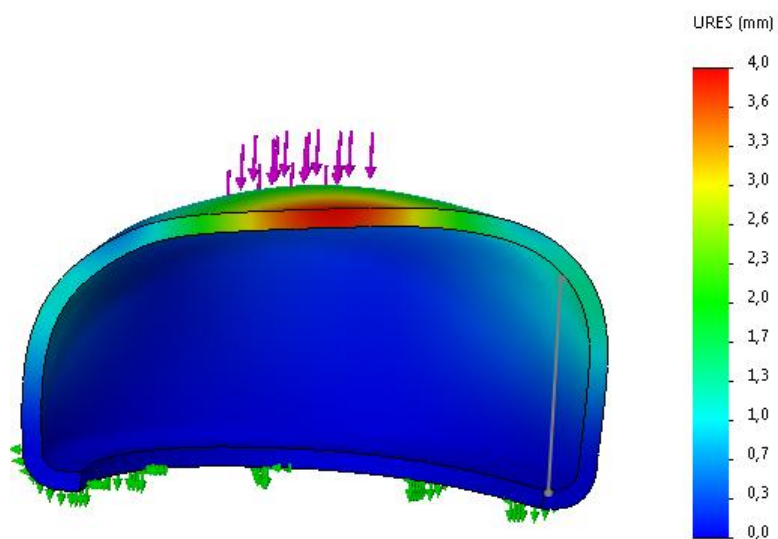
De la misma manera que en el ensayo a compresión, se realiza en la **Figura III.32**, **Figura III.33** y **Figura III.34** una representación de la puntera deformada por la aplicación de la fuerza de impacto y además se facilita una leyenda donde comprobar las zonas con mayor concentración de tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias. Este estudio se ha realizado utilizando como material PLA+Basalto al 60%.

Los resultados obtenidos para todos los materiales en ambos ensayos se contrastarán en el apartado **III.5.2.3 Resultados de los ensayos**.

### III. Desarrollo del trabajo



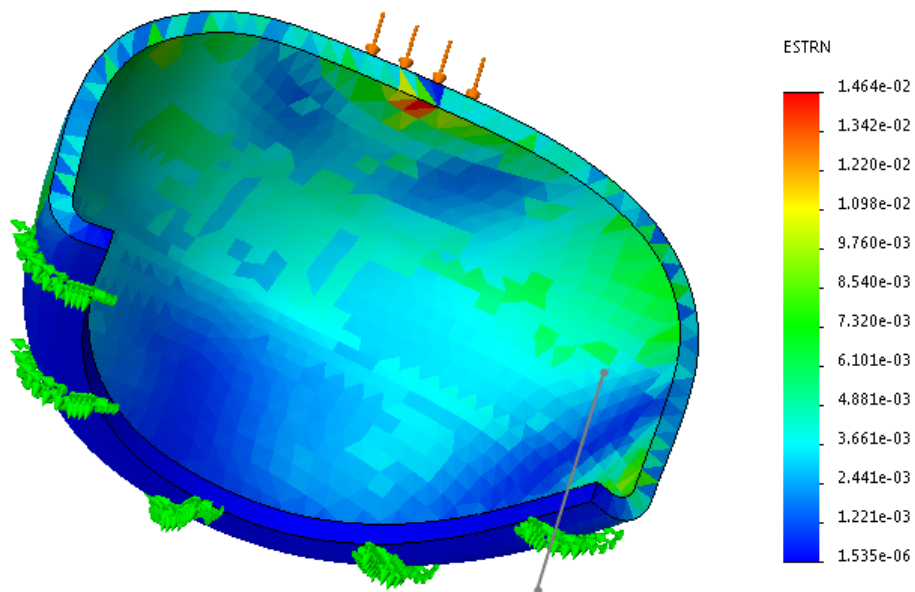
**Figura III.32** Representación de los estados tensionales en el ensayo de impacto para puntera fabricada en PLA+Basalto 60%.



**Figura III.33** Desplazamientos resultantes del ensayo a impacto utilizando PLA+Basalto 60% como material.

### III. Desarrollo del trabajo

---



**Figura III.34** Deformaciones unitarias tras el ensayo a impacto utilizando PLA+Basalto 60% como material.



### III. Desarrollo del trabajo

---

#### III.5.2.3 Resultados de los ensayos

Una vez realizados los ensayos de compresión y de impacto para todos los materiales propuestos, se procede a adjuntar la **Tabla III.12** donde aparecen todos los resultados obtenidos tras calcular el FEM del modelo 3D de la puntera de seguridad.

**Tabla III.12** Tabla del cálculo tensiones-desplazamientos realizados en el ensayo de compresión e impacto para todos los materiales propuestos.

Material	ENSAYO A COMPRESIÓN		ENSAYO A IMPACTO		Masa (g)
	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Desplazamientos (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Desplazamientos (mm)	
Acero F-115	756,9	0,97	754,6	0,70	201,2
Al 3.4370	563,0	3,19	509,9	2,29	72,3
bioPA+Basalto	702,6	6,60	673,3	4,50	52,0
PLA+Basalto	752,4	5,67	733,2	3,97	53,8
EP+CF	749,6	2,50	749,6	1,88	40,0
EP+GF	659,4	11,1	622,5	7,10	50,7
EP+Lino	-	-	-	-	35,1
EP+Yute	-	-	-	-	33,8
EP+Basalto	909,9	10,6	899,5	7,00	53,3

Como se aprecia en la **Tabla III.12**, no se obtiene ningún valor de tensión máxima ni de desplazamientos en SolidWorks para los compuestos EP+Lino y EP+Yute. Este problema es debido a las bajas propiedades mecánicas resultantes de éstos laminados,

### III. Desarrollo del trabajo

---

lo que conlleva con un cálculo infinito de desplazamientos. De este modo, ambos materiales quedan descartados para la realización del proyecto.

Además, en la tabla aparece la masa resultante de la puntera para cada material. Para el cálculo, se obtuvo el volumen de la pieza mediante SolidWorks y se realizó el cálculo de la masa utilizando la siguiente expresión.

$$Masa (g) = \rho \left( \frac{g}{cm^3} \right) * Volumen (mm^3) * 10^{-3}$$

#### III.5.3 Trazado de Factor de Seguridad

Para realizar el cálculo del factor de seguridad, se utilizan los máximos valores de tensión obtenidos para cada material. En este caso, atendiendo a la **Tabla III.12** se comprueba como en el ensayo de compresión se dan los máximos valores para todos los materiales.

De esta forma, se calculan dos factores de seguridad, uno con respecto al límite elástico, y otro con respecto a la rotura del material. Esto se debe a que en la normativa se especifica que el material no debe romper ni superar una deformación, permanente o no, superior a 19,5mm.

$$Fs = \frac{Límite elástico (MPa)}{Tensión máxima (MPa)}$$

$$Fs_{rotura} = \frac{Tensión de rotura (MPa)}{Tensión máxima (MPa)}$$

Si el valor del factor de seguridad es inferior a la unidad, se producen deformaciones permanentes en el diseño. Mientras que, si el valor del factor de seguridad a la rotura es inferior a la unidad, se produce la rotura en el punto dado.

Seguidamente, se adjunta la **Tabla III.13** donde aparecen todos los factores de seguridad para cada material.

### III. Desarrollo del trabajo

---

Tabla III.13 Tabla del trazado del factor de seguridad frente al límite elástico y a la rotura.

Material	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$L_e$ (MPa)	$X_t$ (MPa)	$F_s$	$F_s$ rotura	Masa (g)
Acero F-115	756,9	755,0	840,0	1,00	1,11	201,2
Al 3.4370	563,0	510,0	550,0	0,91	0,98	72,3
bioPA+Basalto	702,6	663,2	1326,4	0,94	1,89	52,0
PLA+Basalto	752,4	729,1	1458,2	0,97	1,94	53,8
EP+CF	775,6	750,0	1500,0	0,97	1,93	40,0
EP+GF	679,2	600,0	1200,0	0,9	1,80	50,7
EP+Basalto	913,9	900,0	1800,0	1,00	2,00	53,3

Como se aprecia en los resultados obtenidos, el aluminio 3.4370 resulta no ser el adecuado para el proyecto puesto que su factor de rotura es inferior a la unidad, lo que provoca su rotura.

Por otro lado, a excepción del Acero F-115 y del laminado compuesto EP+Basalto, los materiales sufren deformaciones permanentes tras la aplicación de la carga. Sin embargo, en ninguno de los casos, se supera una deformación de 19,5mm lo que hace viable su utilización, aunque implicara la sustitución de la puntera una vez soportada la carga.

### III.6 DISEÑO FINAL

Una vez finalizados todos los cálculos en SolidWorks y haber trazado todos los factores de seguridad, se elige un material el cual sea capaz de cumplir rigurosamente con las condiciones de la normativa y además ofrecer ventajas con respecto a las punteras de seguridad utilizadas en la actualidad, esto podría ser la ligereza o bien la eco-eficiencia del material.

Atendiendo a la **Tabla III.13**, se comprueba como cuatro materiales destacan frente al resto. Estos son:

- Acero F-115
- bioPA+Basalto
- PLA+Basalto
- EP+Basalto

Sin embargo, el material elegido para una puntera de seguridad con un espesor de 3mm, es el compuesto PLA+Basalto. Esta elección se debe a los siguientes puntos:

- Proceso reversible debido a que el PLA funde entre 143-177°C y la fibra de basalto no se degrada.
- Tanto la fibra de basalto como el PLA son materiales eco-eficientes.
- Más ligero que las punteras de aluminio y acero utilizadas en el mercado.
- Aunque el peso de la puntera fuese más ligero al realizarse con laminados, la diferencia de masa utilizando PLA+Basalto es mínima.
- El proceso de fabricación (inyección de polímeros termoplásticos) resulta más económico que el moldeo por transferencia de resina utilizado en los compuestos laminados.

De esta forma, se obtiene una puntera de seguridad novedosa y que incorpora características que las punteras actuales no ofrecen. En este caso, el peso de la puntera son 53,8 gramos y además la huella de carbono en el proceso de fabricación es muy inferior a la de cualquier otra puntera. Además, se ofrece mayor versatilidad en el ciclo de vida del producto debido a la reversibilidad del proceso y las fuentes de obtención de los materiales son de origen renovable.

### III.7 FABRICACIÓN

El proceso de fabricación utilizado para la producción de piezas de material compuesto por un polímero termoplástico (matriz) y fibra de refuerzo corta, son los procesos de inyección y extrusión de polímeros.

En primer lugar, se debe de fabricar granza compuesta por PLA y fibra de basalto en un 60%. El primer paso para la fabricación de la granza, consiste en cortar la fibra de basalto a 1mm de longitud entre fibra y fibra, y seguidamente, esta fibra y el PLA son introducidos dentro de un husillo calefactable de una máquina de extrusión la cual funde el PLA. Seguidamente, se extruye la granza compuesta y mediante una sierra de corte se obtienen las dimensiones deseadas <sup>6</sup>.

Una vez obtenida la granza con las condiciones estudiadas, se procede a la realización de un molde de inyección con sus respectivos expulsores, cavidades y zonas de expulsión de gases. Para la optimización del proceso de fabricación, se propone la realización de un molde el cual permita la producción de varias tiradas de punteras de seguridad tanto para el pie derecho como el izquierdo. Seguidamente, el plano de la puntera es enviado a un taller de matricería y fabricación de moldes donde se facilitaría un presupuesto para su fabricación.

Tras la obtención de un molde válido, se monta en la máquina de inyección de polímeros. En este proceso, la granza es introducida dentro del husillo de inyección donde se funde el PLA y es inyectado dentro del molde a altas presiones. Las fibras en el proceso de inyección consiguen dispersarse de forma aleatoria lo que consigue un comportamiento isotrópico en el resultado.

El proceso de inyección, es un proceso automatizado donde el personal empleado es mínimo y su labor es la de comprobar el correcto funcionamiento y mantenimiento de la maquinaria. Esta ventaja se traduce en altos tiempos de fabricación, grandes tiradas de producción y un coste muy competitivo. Además, el rendimiento del material introducido es muy alto puesto que apenas se produce merma en la producción.

### **III. Desarrollo del trabajo**

---

Finalmente, se realizarán estudios de calidad donde se comprobarán las tolerancias de 10 piezas de cada lote para conocer el estado del molde y saber cuándo se necesita un reajuste en el utillaje. Estas mismas piezas se enviarán al laboratorio donde se realizarán ensayos de calidad e impacto según la norma, para poder demostrar anualmente que las punteras fabricadas son aptas y así poder obtener el certificado de calidad ante las auditorías de calidad.

En esta instancia, el producto estaría listo para ser empacado y distribuido a empresas encargadas de la fabricación de zapatos de seguridad con incorporación de punteras de seguridad para la protección de la parte distal del pie.

## III.8 ESTUDIO ECONÓMICO

Para la realización del estudio económico en la puesta en marcha de un proceso de fabricación industrializado a gran escala, se propone utilizar las herramientas utilizadas en finanzas conocidas como VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Interna de Retorno) <sup>32</sup>.

En primer lugar, en la **Tabla III.14** se realiza un desglose y cálculo total aproximado de los costes iniciales que se deben de efectuar para poder iniciar la actividad industrial. Entre estos, se contemplan la maquinaria pesada (extrusora e inyectora), la cortadora de granza tras la extrusión, un molde de 2 cavidades (puntera para pie derecho e izquierdo) y su repuesto, compresor de aire industrial para los accionamientos hidráulicos y la nave industrial donde se realiza la actividad.

**Tabla III.14** Presupuesto de la inversión inicial para la realización del proyecto.

<b>Inversión inicial</b>	<b>Unidad monetaria</b>
<b>Extrusora de granza compuesta</b>	28.000,00€
<b>Inyectora 4300 kN fuerza de cierre</b>	60.000,00€
<b>Cortadora circular de granza</b>	6.000,00€
<b>Molde de 2 cavidades</b>	9.000,00€
<b>Molde de 2 cavidades (repuesto)</b>	9.000,00€
<b>Compresor de aire industrial</b>	7.000,00€
<b>Nave industrial equipada</b>	1.700.000,00€
<b>Coste inversión inicial</b>	1.819.000,00€

### III. Desarrollo del trabajo

---

Seguidamente, en la **Tabla III.15** se obtienen la producción anual de punteras de seguridad en función del tiempo de funcionamiento de la maquinaria y los días laborables y a continuación se obtiene el beneficio anual suponiendo un precio de venta de 2,5€.

**Tabla III.15** Tabla de beneficios anuales en función del coste de venta y del volumen de producción.

<b>Unidades/hora</b>	480uds/hora
<b>Horas laborables</b>	8h
<b>Unidades/día</b>	3840uds/día
<b>Días laborables</b>	250días
<b>Unidades/año</b>	960000uds/año
<b>Precio de venta por unidad</b>	2,50€
<b>Beneficio anual bruto</b>	2.400.000,00€

A continuación, en la **Tabla III.16** se facilita un desglose de costes a partir de las necesidades de la empresa, para poder realizar la fabricación del producto de forma correcta y adecuada. En esta tabla, se contempla el coste anual de los 20 operarios de la empresa, de la materia prima (PLA y basalto) estimadas a partir del número de punteras fabricadas, las posibles reparaciones de los utillajes, herramientas, mantenimiento y costes de producción de la maquinaria (inyectora, extrusora y cortadora).



### III. Desarrollo del trabajo

---

**Tabla III.16** Tabla de costes anuales aproximados de materia prima, mano de obra, equipamiento y costes de producción.

	Unidades	Coste unidad	Coste anual
Operarios	20	25.000,00 €	500.000,00€
PLA	23040 kg	3,18 €/kg	73.267,20€
Basalto	1000 m <sup>2</sup>	25 €/m <sup>2</sup>	25.000,00€
Reparación utillaje	2 veces/año	5.000,00€	10.000,00€
Herramientas operarios	1 vez/año	10.000,00€	10.000,00€
Mantenimiento maquinaria	12 veces/año	5.000,00€	60.000,00€
Coste de producción inyectora	1 vez/año	1.000.000,00€	1.000.000,00€
Coste de producción extrusora	1 vez/año	256.000,00€	256.000,00€
<b>Coste anual total</b>			<b>1.934.267,20€</b>

El beneficio y coste anual, serán utilizados para realizar el estudio del flujo del capital, contrastando de esta manera los costes de fabricación con el beneficio bruto obtenido.

EL VAN y el TIR (valor porcentual) son dos parámetros que ayudan al inversor o empresario en la toma de decisión a la hora de estudiar la viabilidad o rentabilidad de un proyecto a nivel económico. Un proyecto se considera rentable, cuando el VAN es superior a 0 y el TIR supera a la tasa de interés que se ofrece en otro tipo de inversión más pasiva y con menos riesgo, como podría ser la renta fija del 5% que se ofrece en muchos bancos.

Para el cálculo de estos parámetros se utilizan las expresiones representadas en la **Figura III.35** y **Figura III.36**.

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FN_j}{(1+i)^j}$$

**Figura III.35** Expresión para el cálculo del VAN.

### III. Desarrollo del trabajo

---

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} = 0$$

**Figura III.36** Expresión para el cálculo del TIR.

- Io: Inversión inicial
- n: Periodo de tiempo
- i: Tasa de interés
- FN: Beneficio neto

En la **Tabla III.17** se ha obtenido el cálculo del beneficio neto, realizando la resta entre el beneficio bruto y el coste para cada periodo de tiempo. El estudio de la rentabilidad del proyecto, se realiza en un periodo de tiempo de 5 años donde se debe haber recuperado la inversión del capital inicial. Entre cada periodo de tiempo, se supone una obtención del 103% con respecto al año anterior tanto en los beneficios brutos como en el coste debido a la inflación económica.

De esta forma, utilizando la expresión del cálculo del VAN se obtiene el siguiente valor:

$$VAN = -1819000 + \frac{2400000}{(1+0,05)} + \frac{2472000}{(1+0,05)^2} + \frac{2546160}{(1+0,05)^3} + \frac{2622544,8}{(1+0,05)^4} + \frac{2701221,14}{(1+0,05)^5}$$

$$VAN = 315.882,56€$$

Por otra parte, para el cálculo del TIR, se debe de despejar la tasa de interés de la ecuación del VAN igualada al 0. Para ello, se utiliza la hoja de cálculo Excel la cual cuenta con el comando TIR el cual devuelve el resultado tras seleccionar el flujo de caja para cada periodo. Éstos resultados, quedan representados en la **Tabla III.17**.

### III. Desarrollo del trabajo

---

**Tabla III.17** Tabla para el cálculo del VAN y TIR para poder estudiar la rentabilidad del proyecto a partir del beneficio neto anual.

Años	Beneficio Bruto	Coste	Beneficio neto
0	-	-1.819.000,00€	-1.819.000,00€
1	2.400.000,00€	1.934.267,20€	465.732,80€
2	2.472.000,00€	1.992.295,22€	497.704,78€
3	2.546.160,00€	2.052.064,07€	494.095,93€
4	2.622.544,80€	2.113.625,99€	508.918,81€
5	2.701.221,14€	2.177.034,77€	524.186,37€
<b>VAN</b>			315.882,56€
<b>TIR</b>			11%

Una vez comprobados los resultados obtenidos, se deduce que la realización e industrialización del proyecto para la producción de punteras de protección es viable, puesto a que la inversión inicial se recupera a los 5 años, el VAN resulta positivo y se obtiene una rentabilidad anual del 11% lo que se traduce en una tasa de rentabilidad muy superior a la ofrecida en inversiones de renta fija (alrededor al 5%).



## **IV APÉNDICES**



## IV. Apéndices

---

### IV.1 REFERENCIAS

1. Todo sobre la historia de la Prevención de Riesgos Laborales. *Global PRL* <http://www.globalprl.com/todo-sobre-la-prevencion-de-riesgos-laborales/> (2017).
2. El calzado de seguridad: ¡Un siglo de historia! *Tu blog de ropa laboral y calzado de seguridad* <https://blog.modyf.es/2017/11/02/calzado-seguridad-siglo-historia/> (2017).
3. Orígenes del Calzado de Seguridad. <http://procliffprotection.blogspot.com/p/historia-y-origenes-del-calzado-de.html>.
4. Calzado de seguridad con puntera de protección - Costa Oeste Industrial. <https://www.costaoesteindustrial.com/2016/12/09/calzado-con-puntera-de-proteccion/>.
5. Uniforma. Tipos de protecciones en el calzado de seguridad. *Uniforma* <https://www.uniforma.net/blog/tipos-de-protecciones-en-el-calzado-de-seguridad/> (2015).
6. CesEduPack2019. Estudio de las propiedades de los materiales, procesos de fabricación y presupuestos.
7. ¿Cuál es la mejor puntera de seguridad? [http://www.waterfire.es/blog/cual-es-la-mejor-puntera-de-seguridad-aluminio-acero-composite\\_47](http://www.waterfire.es/blog/cual-es-la-mejor-puntera-de-seguridad-aluminio-acero-composite_47).
8. Balart Gimeno, R., López Martínez, J., Sánchez Nácher, L. & Nadal Gisbert, A. *Introducció als materials polimèrics i compostos*. (Monografies de la Universitat Politècnica de València).
9. La Guía De Las Punteras Para Calzado De Seguridad: Acero, Aluminio, Composite, Fibra De Vidrio Y Fibra De Carbono | Safit. <http://www.safit.us/es/blog/la-gu%C3%ADa-de-las-punteras-para-calzado-de-seguridad-acero-aluminio-composite-fibra-de-vidrio-y>.

## IV. Apéndices

---

10. Metal Service. Características Aceros Especiales.
11. Unidad 1: Materiales para ingeniería.  
[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13\\_4.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html).
12. Tabla para la selección de la aleación de aluminio Thyssen Krupp Materials Ibérica inoxaluminio.pdf.
13. La fibra de vidrio - Informacion Digerida \* DEFIBRADEVIDRIO.COM. DEFIBRADEVIDRIO.COM <https://defibradevidrio.com/fibra-de-vidrio/> (2019).
14. Análisis del ciclo de vida (ACV). II edición - UBUAbierta | Universidad de Burgos. <https://www.ubu.es/te-interesa/analisis-del-ciclo-de-vida-acv-ii-edicion-ubuabierta>.
15. ¿En qué consiste la ecoeficiencia? *ecointeligencia - cambia a un estilo de vida sostenible!* <https://www.ecointeligencia.com/2015/11/ecoeficiencia/> (2015).
16. Biodegradables. *EcoInventos* <https://ecoinventos.com/biodegradables/>.
17. Biopolímeros plásticos de origen renovable | Bio-I+D+i.  
[https://www.madrimasd.org/blogs/bio\\_idi/2009/07/24/122251](https://www.madrimasd.org/blogs/bio_idi/2009/07/24/122251).
18. Jordá Reolid, M. "Desarrollo y optimización de mezclas binarias de alto contenido renovable derivadas de bio-polietileno tereftalato (bioPET) y biopoliamida 10,10 (bioPA1010)". (2019).
19. Ruiz Villán, L. VALORIZACIÓN DEL ACEITE DE RICINO EN QUÍMICA DE POLÍMEROS: SÍNTESIS DE POLIÉSTERES Y POLIURETANOS A PARTIR DE HEPTANAL.
20. NaturePlast. Materials and additives portfolio NaturePlast.
21. Ácido poliláctico (PLA) | Textos Científicos.  
<https://www.textoscientificos.com/polimeros/acido-polilactico>.
22. NatureWorks. Ingeo Biopolymer 2003D Technical Data Sheet.



## IV. Apéndices

---

23. Resoltech. Resoltech 1070 ECO Hoja técnica.
24. ENFOQUE DE LA FIBRA: LINO (LINO). <https://www.supreme-creations.es/blog/post/enfoque-de-la-fibra-lino-lino/>.
25. Naturales - Castro Composites.  
<https://www.castrocompositesshop.com/es/68-naturales>.
26. Fibra de yute como material de construcción: arquitectura sostenible. *Arquitectura* <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/fibra-de-yute-como-material-de-construccion-arquitectura-sostenible> (2017).
27. Fibra de basalto. *Basalto* <http://www.basaltcore.com/fibra-de-basalto/>.
28. Tejido de Basalto Tafetán de 220 g/m<sup>2</sup> ancho 1270 mm.  
<https://www.castrocompositesshop.com/es/inicio/1979-tejido-de-basalto-tafet%C3%A1n-de-220-gm2-ancho-1270-mm.html>.
29. Tela composite fibra de basalto by Basaltex | NauticExpo.  
<https://www.nauticexpo.es/prod/basaltex/product-39172-298074.html>.
30. Das, O., Kim, N. K. & Bhattacharyya, D. The mechanics of biocomposites.
31. Fernandes Soares, R. C. Simulação numérica do comportamento ao impacto de componentes para calçado de segurança. (2015).
32. Tasa Interna de Retorno (TIR): definición, cálculo y ejemplos. *Rankia* <https://www.rankia.cl/blog/mejores-opiniones-chile/3391122-tasa-interna-retorno-tir-definicion-calculo-ejemplos> (300AD).

### **IV.2 LISTADOS DE NORMAS UTILIZADAS**

ISO (20345:2011) elaborada por el comité técnico AEN/CTN 81. *“Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo”* apartado 5.3.2.

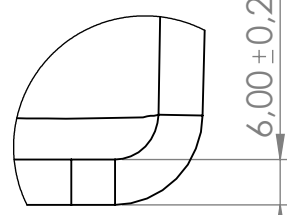
EN (12568:2010) *“Protectores de pies y piernas. Requisitos y métodos de ensayo para topes y plantas resistentes a la perforación”* apartado 4 *“Requisitos para topes”*.

### **IV.3 PLANOS Y ESQUEMAS TÉCNICOS**

4 3 2 1

F

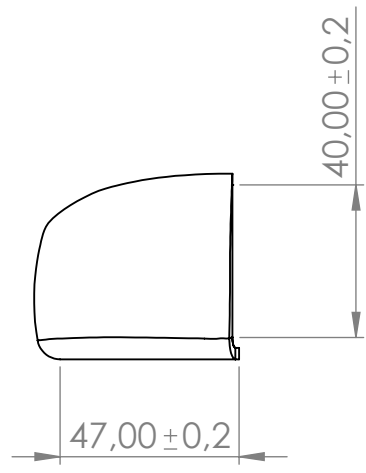
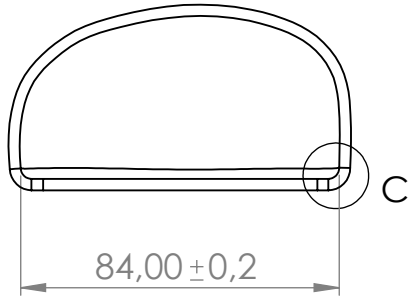
F



DETALLE C  
ESCALA 2 : 1

E

E

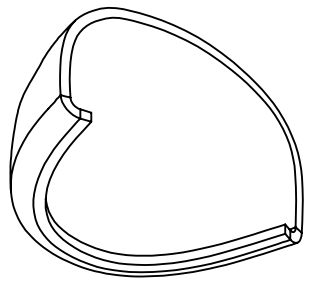
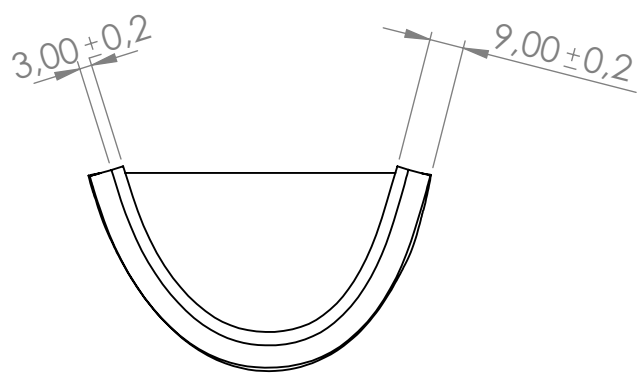


D

D

C

C



B

B



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Puntera de Protección para  
Calzado de Seguridad**

Masa: 53,8g

Autor: Andrés Rico

Escala: 1:1

Material: PLA+Basalto 60%

Formato hoja: A4

Talla: 38 EUROPA

Fecha: 19/06/2020

A

A

4 3 2 1