



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

Diseño de prototipo de protección balística con
integración de tecnología auxética

Ballistic protection prototype design with auxetic
technology integration

Autor: David Romero Diez
Tutor: Joaquín Barreiro García

(Febrero, 2022)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: David Romero Diez

TUTOR: Joaquín Barreiro García

TÍTULO: Diseño de prototipo de protección balística con integración de tecnología auxética

TITLE: Ballistic protection prototype design with auxetic technology integration

CONVOCATORIA: Febrero, 2022

RESUMEN:

Debido a los avances de los últimos años en distintos campos de la ingeniería, se ha hecho necesario un avance simultáneo en el desarrollo de materiales, en una búsqueda de materiales con mejor rendimiento, mejores propiedades mecánicas o simplemente con comportamientos más apropiados para las exigencias de diferentes aplicaciones. Dada esta necesidad, a finales de la década de 1980 los materiales auxéticos empiezan a captar el interés de los investigadores. Este tipo de materiales se caracteriza por tener un coeficiente de Poisson negativo, es decir, al ser “estirados” su sección transversal aumenta, a diferencia de los materiales convencionales (coeficiente de Poisson positivo), cuya sección transversal disminuye. Durante las siguientes treinta años se ha comprobado el gran potencial que muestran este tipo de materiales, no solo en el campo de la ingeniería, sino también en ciencias, medicina, materiales inteligentes, biomedicina e incluso defensa y deportes. Además, su aplicación se ha podido extender a diferentes tipos de materiales; como metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos.

Con el fin de avanzar y contribuir en esta carrera de desarrollo e investigación de los materiales auxéticos, se ha llevado en este trabajo un estudio de una estructura reticular reentrante auxética mediante su aplicación, combinada en una estructura compuesta, en un sistema de protección balística. Se ha realizado un diseño, modelado y modelización de un prototipo de protección, seguido de una serie de simulaciones de elementos finitos con el fin de validar su eficacia ante diferentes tipos de impacto de proyectiles.

ABSTRACT:

Due to the advances of recent years in different fields of engineering, a simultaneous advance in the development of materials has become necessary, in a search for materials with better performance, better mechanical properties or simply with more appropriate behaviors for the requirements of different applications. Given this need, auxetic materials began to attract the interest of researchers in the late 1980s. This type of material is characterized by having a negative Poisson's ratio, i.e., when "stretched" its cross-section increases, unlike conventional materials (positive Poisson's ratio), whose cross-section decreases. Over the next thirty years, the great potential shown by this type of materials has been proven, not only in the field of engineering, but also in science, medicine, intelligent materials, biomedicine and even defense and sports. Furthermore, its application has been extended to different types of materials, such as metals, polymers, ceramics and composites.

In order to advance and contribute to this development and research career of auxetic materials, a study of an auxetic reentrant lattice structure has been carried out in this work through its application, combined in a composite structure, in a ballistic protection system. The design, modeling and modeling of a protection prototype was carried out, followed by a series of finite element simulations in order to validate its effectiveness against different types of projectile impact.

Palabras clave: Materiales auxéticos, coeficiente de Poisson negativo, protección balística, impacto de proyectil, absorción de impactos.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

ÍNDICE

1	Introducción	9
1.1	Motivación	10
1.2	Planteamiento del problema	10
1.3	Metodología	11
1.4	Contribuciones	12
2	Marco teórico	13
2.1	Coeficiente de Poisson	13
2.2	Teoría sobre Impactos.	15
2.2.1	2ª Ley de Newton.	15
2.2.2	Principio de conservación de momento.	18
2.2.3	Ondas de tensión en un impacto.	18
2.2.4	Fases en la interacción entre proyectil y blanco.	22
2.3	Materiales/ Estructuras Auxéticas	24
2.3.1	Definición y clasificación de materiales auxéticos	25
2.3.2	Características de los materiales auxéticos.	29
2.3.3	Aplicaciones de los materiales auxéticos.	31
2.3.4	Fabricación de materiales auxéticos.	33
2.4	Introducción de Software	34
3	Propuesta de diseño	35
3.1	Estructura del diseño del prototipo de protección balística.	36

3.1.1	Capa de protección blindada	36
3.1.2	Capa de estructura auxética	39
3.1.3	Estructura compuesta final del diseño de protección balística	45
3.2	Estudio y análisis de prototipo.	46
3.2.1	Simulación de fuerzas estáticas de compresión sobre estructura auxética.	47
3.2.2	Simulación dinámica de impacto de proyectil sobre el prototipo.	50
4	Conclusiones y futura investigación	60
4.1	Conclusiones	60
4.2	Futura investigación.	61
5	Anexos	63
6.2	Anexo A.	63
6.1	Anexo B.	66
6	Referencias	69

Índice de Figuras

Figura 2.1: Efecto de Poisson.

Figura 2.2: Diagrama de fuerzas impacto de partícula.

Figura 2.3: Diagrama esquemático del impacto balístico de una varilla sobre un objetivo.

Figura 2.4: Reflexión de una onda en zona libre de tensiones.

Figura 2.5: Deformación de una bala en un impacto.

Figura 2.6: Clasificación general de materiales auxéticos.

Figura 2.7: Modelos células de espumas. (a) Convencional. (b) Reentrante.

Figura 2.8: Modelos de estructuras reentrantes 2D (a,b,c) y 3D (d,e).

Figura 2.9: Modelos de estructuras quirales.

Figura 2.10: Modelos de estructuras rotantes. (a) Triangular. (b) Cuadrada. (c) Rectangular.

Figura 2.11: Comportamiento indentación en materiales auxéticos y no auxéticos.

Figura 2.12: (a) Curvatura anticlástica; (b) Curvatura sinclástica.

Figura 2.13: Ejemplo de aplicación de permeabilidad variable.

Figura 2.14: Tipos de fabricación de materiales auxéticos.

Figura 3.1.: NIJ Standard – 0108.01. Resistencia balística de los materiales.

Figura 3.4.: Estructura reentrante auxética con una carga aplicada de compresión.

Figura 3.5.: Cargas sobre pilar de la estructura auxética.

Figura 3.6.: Grafico coeficiente de Poisson.

Figura 3.7.: Gráfico módulo elástico.

Figura 3.8.: Gráfico resistencia a la fractura.

Figura 3.9.: Esquema de las capas del sistema de protección.

Figura 3.10.: Tensión en celda.

Figura 3.11.: Volumen de estructura para simulación.

Figura 3.12.: Desplazamientos de simulación de 500 N.

Figura 3.13.: Distribución vonMises en nodos.

Figura 3.14.: Estructura de partida para simulación de impacto.

Figura 3.15.: Punto de impacto.

Figura 3.16.: Tensiones von Mises en punto de impacto.

Figura 3.17.: Von Mises en Simulación 1.

Figura 3.18.: Von Mises en Simulación 2.

Figura 3.19.: Von Mises en Simulación 3.

Figura 3.20.: Von Mises en Simulación 4.

Figura 3.21.: Gráficos Von Mises/Tiempo de simulaciones.

Figura 3.22.: Desplazamientos en Simulación 1.

Figura 3.23.: Desplazamientos en Simulación 2.

Figura 3.24.: Desplazamientos en Simulación 3.

Figura 3.25.: Desplazamientos en Simulación 4.

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Comportamiento físico de los materiales según el coeficiente de Poisson

Tabla 2.2: Aplicaciones existentes y potenciales de los materiales auxéticos.

Tabla 3.1.: Materiales para protección balística y anti-impactos y aplicaciones.

Tabla 3.2.: Tipos principales de cerámicos y sus propiedades.

Tabla 3.3.: Especificación geométrica de la celda auxética.

Tabla 3.4.: Desplazamientos máximos de las simulaciones.

Tabla 3.5.: proyectiles para las simulaciones.

Tabla 3.6.: Desplazamientos máximos de simulaciones.

1. Introduction

Debido a los avances de los últimos años en distintos campos de la ingeniería, se ha hecho necesario un avance simultáneo en el desarrollo de materiales, en una búsqueda de materiales con mejor rendimiento, mejores propiedades mecánicas o simplemente con comportamientos más apropiados para las exigencias de diferentes aplicaciones. Dada esta necesidad, a finales de la década de 1980 los materiales auxéticos empiezan a captar el interés de los investigadores. Este tipo de materiales se caracteriza por tener un coeficiente de Poisson negativo, es decir, al ser “estirados” su sección transversal aumenta, a diferencia de los materiales convencionales (coeficiente de Poisson positivo), cuya sección transversal disminuye. Durante las siguientes treinta años se ha comprobado el gran potencial que muestran este tipo de materiales, no solo en el campo de la ingeniería, sino también en ciencias, medicina, materiales inteligentes, biomedicina e incluso defensa y deportes. Además, su aplicación se ha podido extender a diferentes tipos de materiales; como metales, polímeros, cerámicos y materiales compuestos. Sin embargo, el conocimiento de los materiales con coeficiente de Poisson negativo se remonta a principio del siglo XX, cuando el físico Woldemar Voigt reportó por primera vez el comportamiento auxético en los cristales del mineral piritita de hierro. Durante los siguientes años, distintos investigadores, como Love (1927) o Gibson (1982), documentaron estudios sobre este comportamiento en distintos materiales. Pero no fue hasta 1987, cuando Roderick Lakes logró fabricar de forma intencionada una espuma polimérica auxética. Este hecho fue el detonante que impulsó el estudio de los materiales auxéticos, al demostrar que podrían crearse materiales y estructuras con esta propiedad y descubrir el amplio abanico de posibilidades disponibles para ellos. [1]

Con el fin de avanzar y contribuir en esta carrera de desarrollo e investigación de los materiales auxéticos, se ha llevado en este trabajo un estudio de una estructura reticular reentrante auxética mediante su aplicación, combinada en una estructura compuesta, en un sistema de protección balística. Se ha realizado un diseño, modelado y

modelización de un prototipo de protección, seguido de una serie de simulaciones de elementos finitos con el fin de validar su eficacia ante diferentes tipos de impacto de proyectiles.

1.1. MOTIVACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, con el fin de continuar con la tendencia en la investigación y estudio de los materiales auxéticos, se ha realizado este trabajo en el que se analiza la aplicación y comportamiento de una estructura auxética en una estructura conjunta con otro tipo de materiales. La aplicación en la que se centra este estudio entra dentro del sector militar o de defensa, no como un elemento militar ofensivo, si no como una estructura de defensa. Al igual que cualquier otro campo de la ingeniería, la ingeniería militar, en lo que se refiere a armamento, proyectiles y sistemas ofensivos también aumenta de forma constante, por lo que es necesario así mismo el desarrollo de elementos de protección más avanzados y con mayor eficacia, que sean capaces de neutralizar estos elementos ofensivos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la aplicación a la que está destinado el prototipo de este trabajo de diseño, es necesario analizar cuidadosamente los distintos factores que influyen de forma significativa en la efectividad del mismo.

- En primer lugar, ya que la función principal del prototipo es detener el avance de un proyectil, es necesario disponer de un sistema o material blindado dedicado a este fin.
- En segundo lugar, el proyectil que se ha detenido mediante el material blindado, es posible que debido a la fuerza de impacto se fragmente o rompa el material blindado, produciendo a su vez fragmentos de este material que podrían convertirse a su vez en nuevos proyectiles. Por lo que es necesario un sistema de protección adicional, en previsión de este posible efecto.

- En tercer lugar, debido a la gran cantidad de energía cinética que transmite el proyectil, es necesario un sistema que absorba la energía del impacto, la cual podría causar también daños en el blanco del proyectil.
- Por otro lado, dada la aplicación a la que está destinado el prototipo, es posible que se implemente en dispositivos móviles, ya sean vehículos, chalecos o escudos de protección, por lo que ha de tener un peso no muy elevado en la medida de lo posible.
- Por último, se ha de implementar la fabricación aditiva para la construcción del prototipo. Esto permitiría una fabricación en serie, abaratando los costes del proceso de producción y de los materiales.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la realización de este proyecto ha sido similar a la comúnmente empleada para el diseño de cualquier prototipo en el campo de la ingeniería.

Se ha empezado por una investigación de los estudios y proyectos similares llevados a cabo con anterioridad al desarrollo de este trabajo, además de un repaso por las leyes y fenómenos implicados en un impacto. Lo que se conoce como un estudio de la literatura y documentación.

A continuación, se ha llevado a cabo un diseño 3D preliminar del prototipo, el cual, tras una serie de análisis y mejoras, ha alcanzado el nivel de diseño final de prototipo.

Tras el diseño geométrico y estructural, se ha procedido con la aplicación de materiales al modelo 3D, seguido por la realización de una serie de simulaciones de elementos finitos con el fin de validar y observar la efectividad del diseño. Estas simulaciones se han llevado a cabo con una extensión del software de modelado 3D Solidworks, dedicado a las simulaciones estáticas y dinámicas.

Por último, se ha realizado un análisis de los resultados y se han planteado posibles vías de continuación con el estudio.

1.4. CONTRIBUCIÓN

Este proyecto está centrado en la realización de un prototipo de protección balística, llevado a cabo desde cero, basado en estudios previos sobre el campo. Se ha implementado la tecnología auxética mediante el método de fabricación aditiva.

A modo de resumen, las principales contribuciones de este proyecto son:

- Un diseño 3D completo de un prototipo de protección balística compuesto.
- Un modelizado de una estructura auxética reentrante, junto con un análisis de su comportamiento y propiedades que presenta.
- Simulaciones de fuerzas estáticas sobre la estructura auxética para observar su comportamiento ante fuerzas de compresión.
- Simulaciones de fuerzas dinámicas no lineales sobre una estructura compuesta, con el fin de observar del comportamiento del prototipo antes diferentes impactos.

2. Marco teórico

Debido al interés que los materiales o estructuras auxéticas suscitan, cada vez más estudios se están llevando a cabo con el fin de conocer más a fondo las propiedades y el potencial que este tipo de materiales pueden llegar a tener, así como desarrollar aplicaciones funcionales que superen las prestaciones ante otro tipo de material común. Por ello, previamente al desarrollo de este proyecto, se realizará en este capítulo un repaso a las investigaciones existentes y a la teoría aplicable relacionadas con la realización de este proyecto. Este repaso se centrará principalmente en tres grandes grupos: el coeficiente de Poisson (imprescindible para la definición de materiales auxéticos), estructuras auxéticas e aplicación de materiales auxéticos mediante impresión 3D.

2.1. COEFICIENTE DE POISSON

Como se ha mencionado anteriormente, la propiedad más característica que define a los materiales auxéticos es el coeficiente de Poisson. El coeficiente de Poisson es una constante que puede definirse como la relación entre la tensión de contracción transversal y la tensión de extensión longitudinal en un objeto [2], o bien, de forma equivalente, como la deformación de un material, ya sea de contracción o de expansión, en la dirección perpendicular a la dirección en la que se aplican las cargas. [3]

El coeficiente de Poisson sirve para medir el efecto de Poisson, el cual es equivalente a la siguiente expresión:

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}} \quad (2.1)$$

Donde $d\varepsilon$ es la variación de la deformación, ya sea en la dirección transversal o axial.

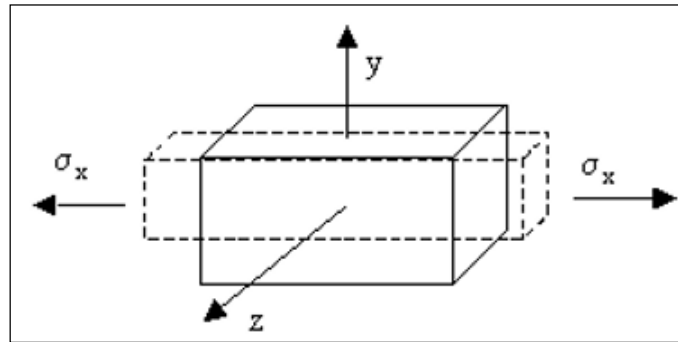


Figura 2.1: Efecto de Poisson. [3]

Y aplicando la anterior definición del coeficiente de Poisson y el módulo de Young, se puede particularizar la ley de Hooke en materiales isótropos mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [\sigma_{ij}(1 + \nu) - \nu\delta_{ij}\sigma_{kk}] \quad (2.2)$$

Donde E es el módulo de Young, σ_{ij} es la tensión en una dirección y δ_{ij} is the Kronecker delta.

De esta forma, se puede ver la forma en la que se relacionan el módulo de Young y el efecto de Poisson mediante la ley de Hooke, que junto al módulo de cizallamiento (G) al módulo de compresibilidad (K) definirán el comportamiento elástico de un material.

Estas cuatro constantes se relacionan además entre sí mediante las siguientes expresiones:

$$K = \frac{\sigma}{\Delta V/V} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad ; \quad G = \frac{\sigma_{xy}}{2\varepsilon_{xy}} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad , \quad (2.3) \quad (2.4)$$

de las cuales se pueden deducir los valores límite del coeficiente de Poisson, que serían $-1 < \nu < 0.5$, y su clasificación y comportamiento:

COEFICIENTE DE POISSON	COMPORTAMIENTO FÍSICO
$\nu=-1$	Conservación de la forma
$\nu=-0.5$	Conservación del módulo (Young's modulus=shear modulus)
$\nu=0$	Conservación de la sección transversal
$\nu=0.5$	Conservación del volumen
$\nu=1$	Conservación del área

Tabla 2.1: Comportamiento físico de los materiales según el coeficiente de Poisson [4].

Continuando con el módulo de cizallamiento y el módulo de compresibilidad, siendo el módulo de Young constante, se puede observar que en la mayoría de los casos para un $\nu > 0$, K siempre será mayor que G. Sin embargo, en el caso de tener $\nu < 0$ (materiales auxéticos), se obtendrá un módulo de cizallamiento bastante mayor en relación al módulo de compresibilidad. Esto supone que el material con coeficiente de Poisson negativo será fácilmente deformable volumétricamente, pero opondrá una mayor resistencia al corte.

2.2. TEORÍA SOBRE IMPACTOS

2.2.1. 2ª Ley de Newton

Para empezar, se empezará abordando el estudio de un impacto con un enfoque que parte de la 2ª ley de Newton, de donde se podrán obtener una serie de conclusiones importantes.

$$F = m \frac{d^2r}{dt^2} \quad (2.1)$$

De donde, integrando, se puede obtener la cantidad de movimiento de un cuerpo de masa m en un intervalo de tiempo ($t_0 \rightarrow t_0+\tau$).

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} F dt = m(\dot{r}(t) - \dot{r}_0) = m(v(t) - v_0) = J \quad (2.2)$$

Cuando F tiene una duración arbitraria, la expresión anterior describe el impulso de una fuerza.

Cuando la duración de F tiende a cero, entonces J define el impulso de impacto y F es la fuerza instantánea o fuerza de impacto.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{t_0}^{t_0+\tau} F d\tau \quad (2.3)$$

Promediando el valor de la integral de la expresión anterior, se obtiene

$$F_{av} = \frac{J}{\tau} \quad (2.4)$$

donde se puede ver que cuando τ tiende a cero, entonces la fuerza F_{av} tiende a infinito, lo cual describe el aumento de la fuerza de impacto en el momento en el que colisiona un cuerpo con otro.

Continuando a partir de la ecuación 2.10, donde v_0 y v representan la velocidad antes y después del impacto respectivamente, se puede llegar a la siguiente conclusión:

$$m(v(t) - v_0) = m\dot{r}_0\tau \int_{t_0}^{t_0+\tau} \left(\int_{t_0}^{t_0+\tau} F d\tau \right) d\tau \quad (2.5)$$

Y si τ tiende a 0, entonces

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{t_0}^{t_0+\tau} F d\tau = J; \quad \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{t_0}^{t_0+\tau} J d\tau = 0 \quad (2.6)$$

De lo que se deduce que la posición del cuerpo que impacta es la misma antes y después de la colisión.

Por otro lado, para realizar una interpretación física de un impacto, se parte considerando una partícula de radio despreciable impactando contra un cuerpo

deformable estacionario, lo cual produce dos fuerzas de acción y reacción debido a la deformación del material.

$$\begin{cases} J_1 = \int_{t_0}^{t_0+\tau_1} N_1 d\tau = mv_1 \cos\alpha \\ J_2 = \int_{t_0}^{t_0+\tau_2} N_2 d\tau = mv_2 \cos\beta \end{cases} \quad (2.7)$$

α : ángulo de incidencia

β : ángulo de salida

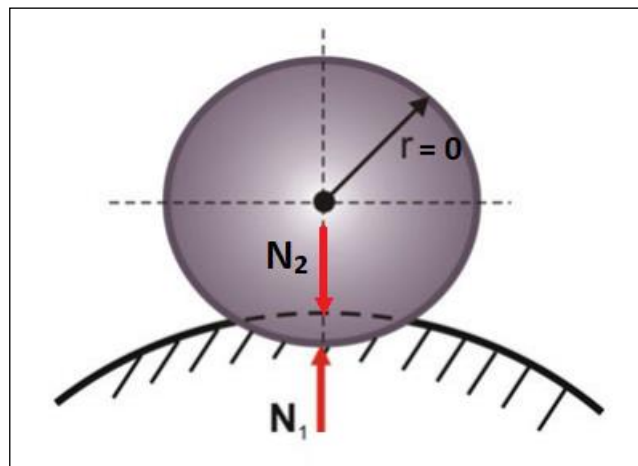


Figura 2.2: Diagrama de fuerzas impacto de partícula.

A partir del radio de impulso (J_2 / J_1) se obtiene el coeficiente de restitución:

$$e = \frac{J_2}{J_1} = \frac{mv_2 \cos\beta}{mv_1 \cos\alpha} \quad (2.8)$$

Este coeficiente de restitución variará entre $0 \leq e \leq 1$. Este rango de valores se define de la siguiente forma:

- $e = 0$: El impacto es completamente plástico ($v_2 = 0$).
- $e = 1$: El impacto es completamente elástico ($v_2 = v_1$; $\alpha = \beta$).

Para concluir, se introduce el modelo de un cuerpo deformable, en el cual una partícula colisiona con un cuerpo manteniendo $\alpha = \beta = 0$, para calcular la diferencia de energía cinética antes y después de un impacto:

$$T_1 - T_2 = \frac{mv_1^2 - mv_2^2}{2} = \frac{mv_1^2 - mv_1^2 e^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} (1 - e^2) \quad (2.9)$$

De la expresión anterior puede deducirse que, cuanto menor sea el coeficiente de restitución, mayor será la pérdida de energía cinética en un impacto, debido a su conversión en calor. Por lo que, en el caso de un impacto completamente elástico, la conversión en calor será nula, ya que $e = 0$ y $T_1 = T_2$. En cambio, en un impacto completamente plástico, toda la energía se convertirá en calor. [5]

2.2.2. Principio de conservación de momento

El principio de conservación de momento, es una de las leyes necesarias para la comprensión del comportamiento de los cuerpos durante un impacto.

Partiendo de la expresión 2.3, la cual define el impulso de impacto, se puede postular la siguiente ecuación, donde se recogen las fuerzas instantáneas o de impacto:

$$\sum_{n=1}^N J = \sum_{n=1}^N \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{t_0}^{t_0+\tau} F_n d\tau = P - P_0 \quad (2.9)$$

De esta ecuación se puede deducir que la variación de momento en el instante preciso del impacto es equivalente a la suma de impulsos externos generados por las fuerzas instantáneas que actúan sobre el sistema. [5]

2.2.3. Ondas de tensión en un impacto

Debido a la aplicación práctica en la que se centra el estudio de este proyecto, cabe tener en cuenta así mismo una serie de fenómenos que tienen lugar cuando sucede un impacto entre dos objetos. Esta serie de fenómenos físicos son: propagación de ondas

de choque, elásticas y plásticas, deformación, fractura y fragmentación, perforación y espalación (emisión de fragmentos debido a un impacto). [6]

Para realizar el estudio de la mecánica de un impacto, se puede comenzar con un modelo de dinámica de cuerpos rígidos. Este modelo se basa en la ley impulso-momento para cuerpos rígidos y presupone que, al aplicar una fuerza en un punto de un cuerpo, todos los puntos del mismo se ponen en movimiento simultáneamente al mismo tiempo y la distancia relativa entre dos puntos cualquiera no varía.

En este modelo, la energía que se pierde en el impacto entre dos cuerpos se representa mediante el coeficiente de restitución (e):

$$e = \frac{(v_{2f} - v_{1f})}{(v_{20} - v_{10})} \quad (2.10)$$

Donde v_{2f} y v_{1f} representan las velocidades del primer cuerpo con masa = m_1 y del segundo cuerpo con masa = m_2 después del impacto respectivamente, y v_{10} y v_{20} representan las velocidades de m_1 y m_2 antes del impacto.

Este coeficiente de restitución se puede definir como una medida del grado de conservación de energía cinética ante el choque de dos partículas.

Sin embargo, este modelo es bastante limitado, ya que no es capaz de describir fuerzas, tensiones o deformaciones transitorias. En el caso de disponer de fuerzas aplicadas en periodos cortos de tiempo y deformaciones significativas, para una mayor aproximación a la realidad, se debe tener en cuenta la propagación de ondas de tensión a través del cuerpo.

En este supuesto se pueden dar dos casos diferentes dependiendo del cuerpo: propagación de ondas de tensión en un medio perfectamente elástico o propagación de ondas de tensión en un medio que no es perfectamente elástico.

- Propagación de ondas de tensión en un medio perfectamente elástico:

En un impacto, se generan ondas de deformación que se propagan alejándose del punto de impacto a través del receptor del mismo.

Como ejemplo, siguiendo el estudio de Goldsmith [6] sobre este modelo, se puede obtener el desplazamiento de una varilla producido por una carga como forma de representación de las ondas estacionarias:

$$u = - \left\{ \frac{\sigma_0 t^2}{2\rho L} + \frac{2\sigma_0 L}{\pi^2 E} \sum \frac{(-1)^i}{i^2} \cos\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{i\pi c_0 t}{L}\right) \right] \right\}, \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (2.11)$$

$$v = \frac{du}{dt} = 0, \quad t = 0, \quad 0 \leq x \leq L$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad t \geq 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\sigma_0}{E}, \quad X = L, \quad T \geq 0$$

Donde σ_0 representa el esfuerzo de compresión, E es el módulo de Young, ρ es la densidad de la barra, L es la longitud de la barra y v y t representan la velocidad y el tiempo respectivamente.

Sin embargo, este modelo tampoco es del todo preciso en el supuesto de darse el caso de tener deformación (como sería el impacto de un proyectil), por lo que sería necesaria la postulación de otra expresión a mayores. La teoría de Hertz [8] recoge la relación entre una fuerza aplicada normal y la deformación que produce.

$$F = K_c \alpha^{3/2} \quad (2.12)$$

Donde K_c representa la rigidez, α la deformación normal y F la fuerza de contacto normal.

- Propagación de ondas de tensión en un medio que no es perfectamente elástico:

En el caso en el que el medio no sea completamente elástico, es decir, en el caso en el que el impacto provoque una deformación plástica, la expresión vista anteriormente (2.7) se modifica añadiéndole un factor de amortiguación para reflejar la disipación en el área de contacto.

$$F = F_c(\alpha) + F_v(\alpha, \dot{\alpha}) + F_p(\alpha, \dot{\alpha}) \quad (2.13)$$

Donde F_c representa la parte elástica de la fuerza, F_v la parte de amortiguación viscosa y F_p la parte de disipación de la fuerza debido a la deformación plástica. [6]

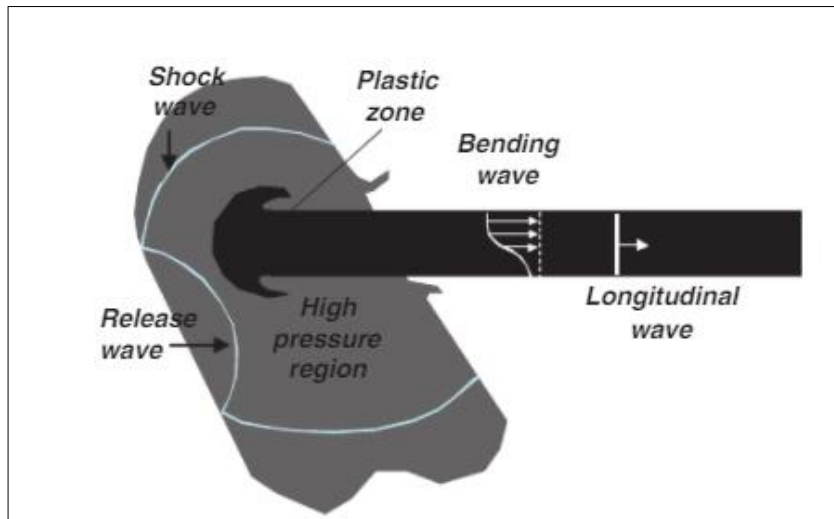


Figura 2.3: Diagrama esquemático del impacto balístico de una varilla sobre un objetivo. [9]

Siguiendo con el tema de propagación de ondas, pero centrándolo en el campo de la balística, se pueden dar distintos casos dependiendo del tipo de proyectil y la velocidad a la que impacta en el objetivo. Para un rango de velocidades bajas (1 a 2 km/s), la resistencia mecánica de tanto el proyectil como del objetivo son propiedades importantes a tener en cuenta, en cambio, para una velocidad mayor a 2 o 3 km/s y hasta 6 km/s, la fuerza de impacto es tal que la resistencia mecánica de ambos cuerpos puede ser ignorada. El material pasa a comportarse hidrodinámicamente de forma temporal. Más allá de 6 km/s el material se vaporizaría debido a la fuerza de impacto. [9]

J. Hopkinson y J.S. Rinehart llevaron a cabo estudios respecto a este tipo de ondas que se generan en un impacto y recorren el cuerpo que recibe el impacto [10]. Estas ondas recorren el cuerpo hasta que alcanzan una zona libre de tensiones, la cual refleja la onda que regresa a la zona del impacto. En esta zona de impacto será donde se generen los fallos y roturas en el blanco.

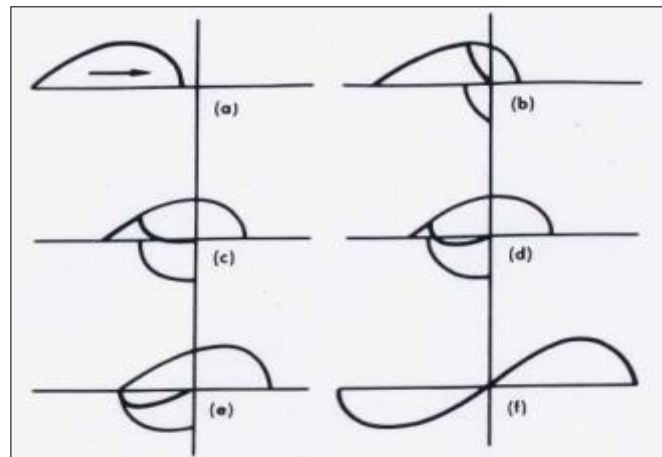


Figura 2.4: Reflexión de una onda en zona libre de tensiones.

2.2.4. Fases en la interacción entre proyectil y blanco

En el momento que un proyectil alcanza un cuerpo – blanco, esta interacción entre ambos objetos atraviesa una serie de fases [11]:

1. **Fase de impacto:** Esta es la primera fase y la más importante de las tres. Esto se debe a que las siguientes dos fases dependen de lo que suceda en esta fase. En esta fase, tienen gran relevancia los materiales y las propiedades que presentan, ya que depende de ellos que la interacción entre el proyectil y el objetivo supere los valores críticos de rotura y el proyectil pase a la siguiente fase; la fase de penetración. Tan importantes son las propiedades y comportamientos de los materiales del cuerpo que recibe el impacto (que hemos ido describiendo en los apartados anteriores), como los de los materiales del proyectil, debido a que, tras el impacto, se generan unas fuerzas de tracción radialmente en el proyectil, las cuales deforman la cabeza del mismo y puede llegar hasta romperlo.



Figura 2.5: Deformación de una bala en un impacto.

2. Fase de penetración: Esta fase se produce, seguidamente al impacto, cuando la presión ejercida por el proyectil supera el valor crítico de deformación del material del cuerpo que recibe el impacto, creando un cráter y haciendo incidir el proyectil en el blanco. A medida que el proyectil avanza a través del cuerpo del blanco, la presión y la energía cinética del mismo van disminuyendo, transformándose en calor y agrandando el cráter producido por el proyectil. Si el proyectil termina por fundirse o detenerse sin llegar a atravesar el cuerpo del blanco por completo, la interacción proyectil-blanco acabaría en ese momento, en cambio, si logra atravesarlo por completo, la interacción pasaría a la última fase.
3. Fase de perforación: En esta fase el proyectil termina por atravesar el blanco. Existen varios tipos de perforación; entre los principales se encontrarían los siguientes:
 - Fragmentación: División del proyectil en fragmentos, que actuarán así mismo como proyectiles sobre un nuevo blanco. Típico en materiales frágiles.
 - Fractura: Ruptura generada por tensiones producidas por las ondas de tracción-compresión del impacto, típicamente en materiales de propiedades medias-bajas.
 - Rotura dúctil: Perforación acompañada por expansión radial del material del objetivo según avanza el proyectil.
 - Scabbing: Suceso producido por ondas de presión generadas por el impacto que producen una sobrepresión en el material del

blanco. Típicamente producido por proyectiles con carga explosiva que detona tras el impacto.

- **Plugging:** En esta perforación se desprende un "tapón" del blanco, aproximadamente del tamaño del proyectil, debido al movimiento del mismo.
- **Petalling:** Se produce al penetrar el proyectil deformando el blanco y creando una "corona" en el blanco que rodea la punta del proyectil.

2.3. MATERIALES / ESTRUCTURAS AUXÉTICAS

Debido a la incipiente carrera tecnológica de los últimos años y a la cada vez mayor demanda de materiales especializados para el desempeño de tareas concretas, surge la necesidad de mejores materiales o de materiales optimizados con una serie de características concretas, los cuales no pueden encontrarse de forma natural. Por ello, a finales del siglo XIX, se desarrollan de forma artificial los metamateriales.

Los metamateriales, según R.M. Wasler [12], "se definen como un compuesto macroscópico que tiene una arquitectura celular periódica, tridimensional, hecha por el hombre, diseñada para producir una combinación optimizada, no disponible en la naturaleza, de dos o más respuestas a una excitación específica".

Existen varios tipos de metamateriales dependiendo de la función para la que se hayan creado y las características específicas de las que se le ha dotado. La familia más extendida actualmente es la de los metamateriales electromagnéticos, compuesta por otros subtipos de materiales: negativos una vez (SNG), doblemente negativos (DNG), doblemente positivos (DPS), de banda prohibida (EBG), bi-isótropos, quirales, ajustables y plasmónicos. Sin embargo, existen otras familias de metamateriales: acústicos, no-lineales, estructurales, mecánicos...

En el caso de este proyecto, la familia más relevante de metamateriales son los mecánicos, ya que dentro de esta familia se encuentran los materiales auxéticos.

2.3.1. Definición y clasificación de materiales auxéticos

Los materiales auxéticos, según la definición propuesta por el profesor de la universidad de Exeter, Ken Evans, son materiales que poseen un coeficiente de Poisson negativo. Esto viene a expresar que, este tipo de materiales al ser sometidos a tracción, tiende a aumentar la sección transversal. La etimología de la propia palabra “auxético” proviene del griego (αύξητικός), cuyo significado es “que tiende a aumentar”. [13]

Existen varios tipos de materiales o estructuras auxéticas, de procedencia tanto natural como artificial, y se pueden dividir de forma general, de la siguiente forma (Figura 2.6):

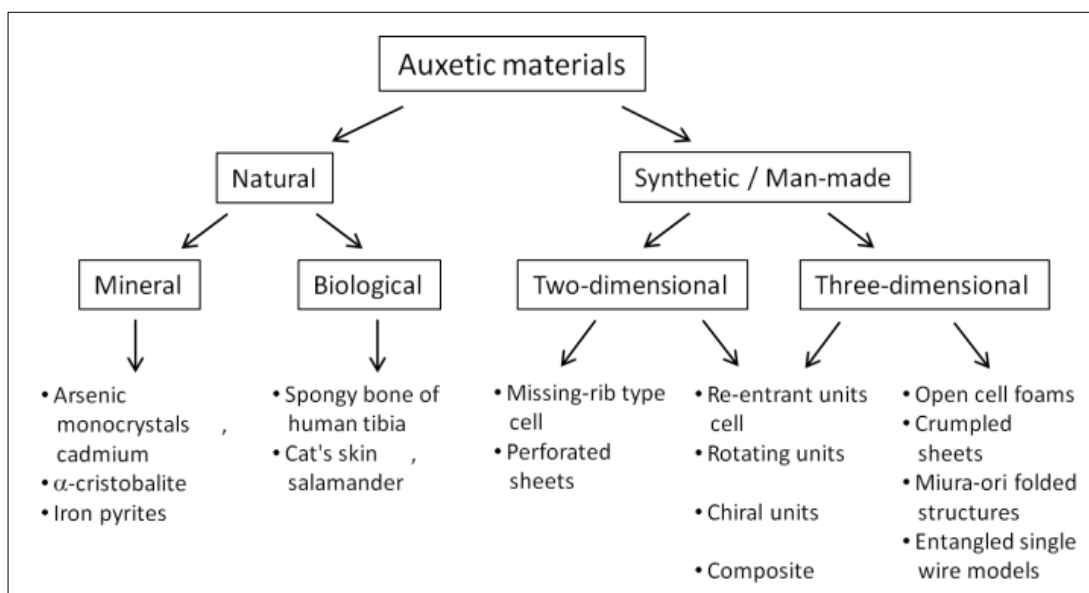


Figura 2.6: Clasificación general de materiales auxéticos. [14]

Dentro del grupo de materiales auxéticos relevantes para este estudio (materiales auxéticos sintéticos o artificiales), los tipos de materiales o estructuras auxéticas más extendidos son: polímeros y sólidos reticulares. [16]

- Polímeros auxéticos: Los materiales poliméricos con coeficiente de Poisson cero están diseñados para tener un marco de macromoléculas o estructuras macroscópicas que muestran un comportamiento auxético. Este tipo de material auxético puede fabricarse en forma de espuma, fibras y compuestos.
 - Espumas auxéticas: Las espumas con coeficiente de Poisson negativo son estructuras celulares reentrantes o invertidas logradas a partir de la

compresión volumétrica permanente isotrópica de una espuma convencional. Dentro de este grupo de estructuras auxéticas se pueden encontrar diferentes tipos de espumas, como son las espumas de polímero, las espumas metálicas dúctiles o las espumas de polímero termoestable.

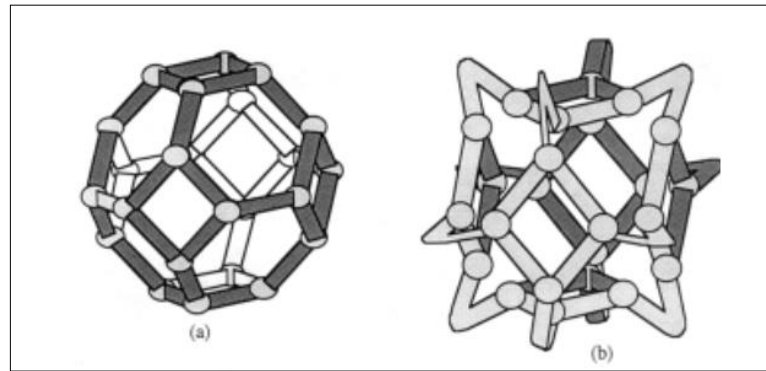


Figura 2.7: Modelos células de espumas. (a) Convencional. (b) Reentrante. [15]

- Fibras poliméricas: El primer material compuesto por fibras poliméricas microporosas con coeficiente de Poisson negativo fue una forma expandida de PTFE (Teflón). Su comportamiento auxético es causado por microestructura de nódulos interconectados por fibras. Tras la fabricación de este material, se llegó a la conclusión que otros polímeros también podrían ser procesados para mostrar un comportamiento auxético, mediante un proceso que consiste en compactación, sinterización y extrusión.
- Compuestos poliméricos: Este tipo de materiales auxéticos pueden fabricarse a partir de componentes convencionales, mediante diferentes configuraciones estructurales internas especialmente diseñadas, o a partir de refuerzos auxéticos. En el primer caso, se utiliza una estructura preimpregnada (pre-preg), la cual presenta secuencias de apilamiento específicas para producir efectos auxéticos. Con este método, los laminados compuestos pueden adquirir una relación de Poisson negativa en el plano o fuera del plano. Para ello, los materiales individuales de las capas han de ser altamente anisotrópicos. Algunas de

estas combinaciones son: fibra de carbono/ epoxy, fibra de vidrio/ epoxy, Kevlar/ epoxy.

- **Sólidos reticulares:** En este grupo se podrán encontrar estructuras auxéticas tanto en 2D como en 3D. Este tipo de materiales debe su nombre a la estructura repetitiva de celdas macroscópicas que los forman. Por este motivo, a este tipo de estructuras que forman se les da el nombre de estructuras de panel. Las estructuras auxéticas de panel más relevantes son: estructuras reentrantes, estructuras quirales y estructuras rotantes.
 - **Estructuras reentrantes:** Este tipo de estructuras auxéticas está formado por hexágonos reentrantes tanto en 3D como en 2D (Figura 2.8). En principio, la alineación de las costillas diagonales a lo largo de la dirección horizontal cuando se aplica una fuerza de tracción, hace que se separen a lo largo de la dirección vertical, lo que supone un comportamiento auxético. Pero realmente, la mayoría de este tipo de estructuras de panel se deforman principalmente por flexión de las costillas diagonales, apareciendo al mismo tiempo una bisagra y un estiramiento axial de las costillas. La flexión de las costillas supone de igual forma un comportamiento auxético.

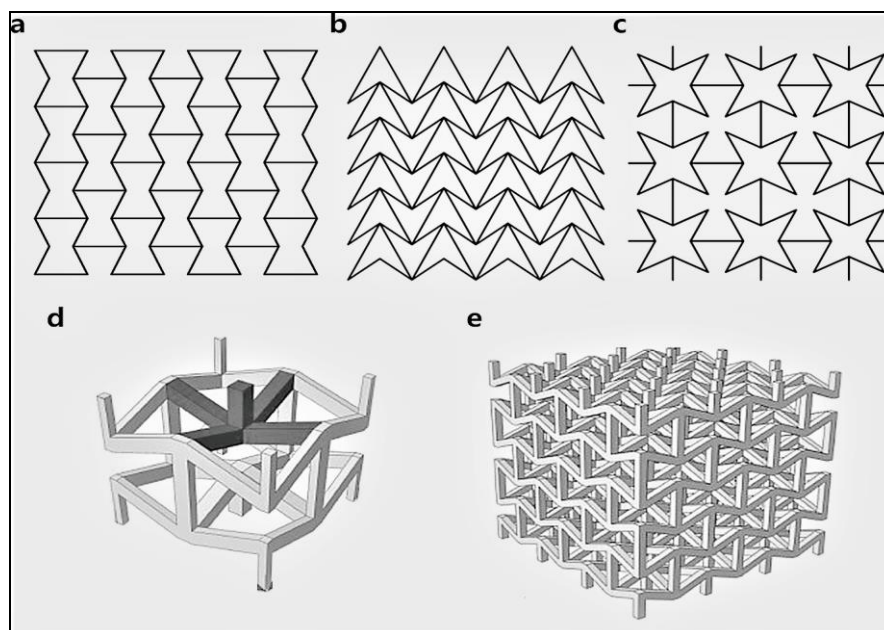


Figura 2.8: Modelos de estructuras reentrantes 2D (a,b,c) y 3D (d,e).

- Estructuras quirales: Otro tipo de estructura de panal son las estructuras quirales. Están formadas por una red de nodos centrales con forma geométrica, conectados por ligamentos o costillas. El comportamiento auxético se presenta al aplicarse una carga sobre la estructura, provocando un efecto torsor sobre las celdas, que hace rotar los ligamentos y se enrollen y desenrollen alrededor de los nodos.

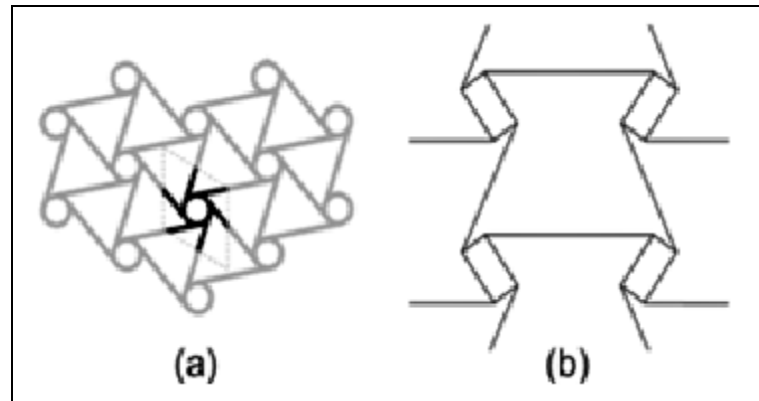


Figura 2.9: Modelos de estructuras quirales. [16]

- Estructuras rotantes: Este tipo de estructuras auxéticas están diseñadas principalmente para su uso en espumas e hipotéticamente, en nanoestructuras de redes de polímeros. Su fabricación consiste en la unión de triángulos, cuadrados, rectángulos o tetraedros rígidos o semirrígidos en determinados vértices articulados o unidos con muelles. El comportamiento auxético se presenta mediante la rotación de las celdas al aplicar una fuerza.

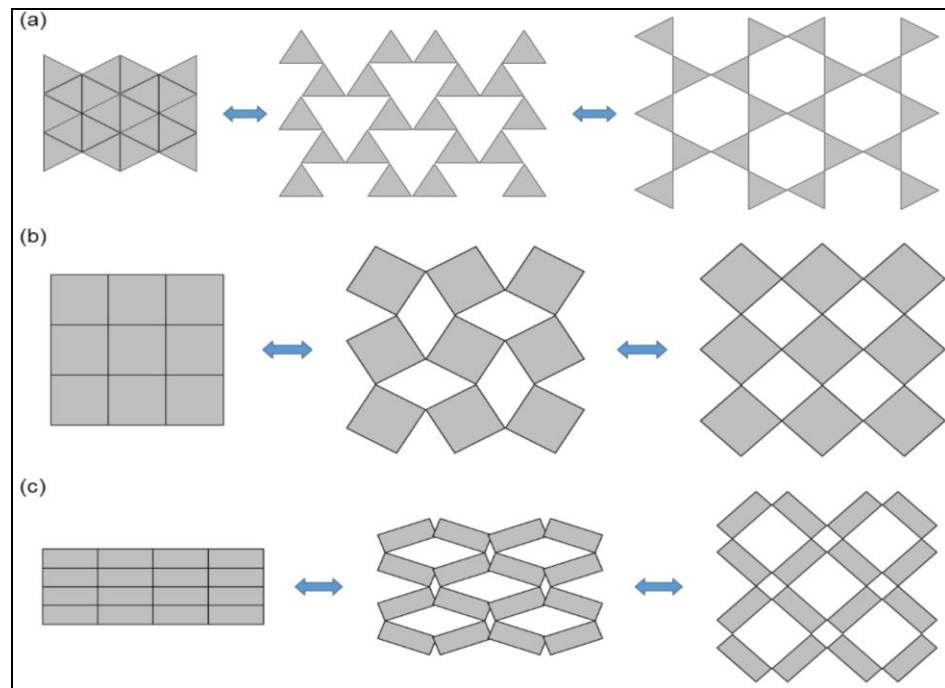


Figura 2.10: Modelos de estructuras rotantes. (a) Triangular.

(b) Cuadrada. (c) Rectangular.

2.3.2. Características de los materiales auxéticos

A pesar de existir diferentes tipos de materiales auxéticos, estos comparten una serie de características comunes que les permiten sobresalir sobre los materiales comunes. Las propiedades características principales de estos materiales son las siguientes [14] [17]:

- Absorción de energía: Varios estudios experimentales muestran un mayor amortiguamiento y absorción de energía comparados con materiales convencionales.
- Resistencia a la indentación: Cuando un material convencional se somete a un experimento de indentación, la fuerza aplicada supone una compresión local en el material, lo cual lleva a una expansión perpendicular a la fuerza aplicada con el fin de compensar la presión local ejercida por la misma.

En cambio, en los materiales auxéticos, el comportamiento de estos es opuesto al descrito anteriormente. Al realizar el mismo ensayo, el material auxético tiende a comprimirse localmente debajo de la zona de compresión. Esto conlleva

un aumento de densidad y de resistencia a la deformación en la zona de aplicación de la carga.

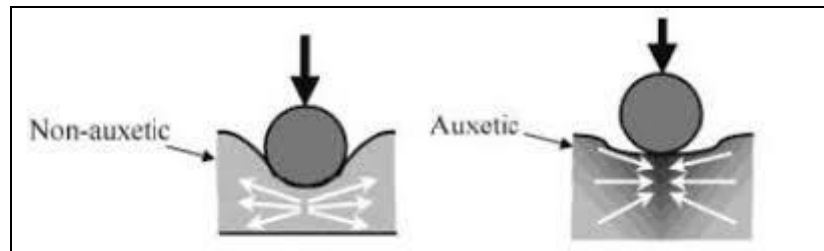


Figura 2.11: Comportamiento indentación en materiales auxéticos y no auxéticos.

- Resistencia a la cizalladura: Como se ha deducido anteriormente mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4, un material auxético presentará una mejor resistencia a la cizalladura que un material no auxético ante un módulo de Young y de compresibilidad constante.
- Resistencia a la fractura: Gracias a estudios previos [18], se ha demostrado que una grieta en un material auxético necesita más energía para propagarse que en un material convencional. De tal forma que, cuanto menor sea el coeficiente de Poisson (cuanto más se aproxime a -1), más duro será el material.
- Absorción acústica: De igual forma que los materiales auxéticos se comportan con la absorción de energía, estos presentan una mayor absorción de ondas sonoras que los materiales convencionales, sobre todo ante frecuencias inferiores a 1500 Hz.
- Curvatura sinclástica: Esta característica permite a los materiales auxéticos deformarse en forma de cúpula cuando son sometidos a flexión. Esta propiedad permite la construcción de estructuras complejas de forma más sencilla, evitando el malgasto de materiales y dinero.

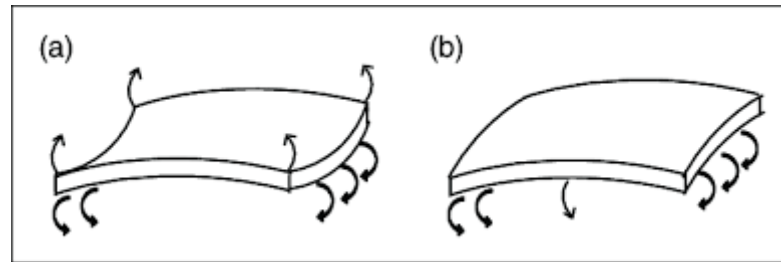


Figura 2.12: (a)Curvatura anticlástica; (b)Curvatura sinclástica.

- Permeabilidad variable: Debido a la estructura porosa que compone los materiales auxéticos, es posible variar el tamaño de estos “poros” mediante la aplicación de fuerzas de tracción y compresión. Esto permite variar la permeabilidad de estos materiales y pueden llegar a usarse como filtros.

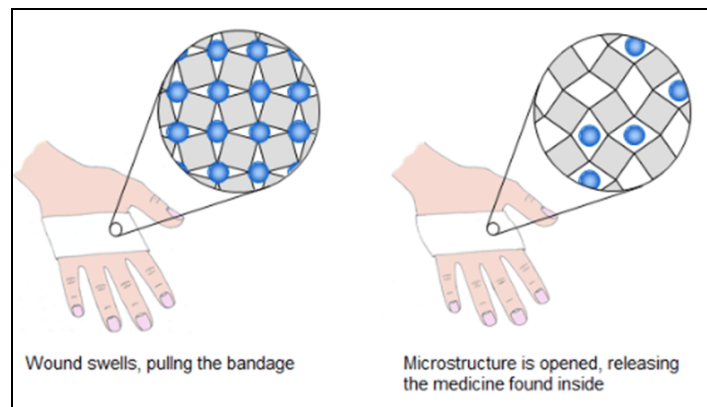


Figura 2.13: Ejemplo de aplicación de permeabilidad variable.

- Memoria de forma: Los materiales auxéticos son capaces de, ante una deformación plástica o semiplástica, volver a su forma inicial previa a la aplicación de la fuerza de deformación.

2.3.3. Aplicaciones de los materiales auxéticos

Como se ha mencionado con anterioridad, el desarrollo de los materiales auxéticos se lleva a cabo con el fin de disponer en ellos mejores prestaciones y propiedades que en los materiales convencionales, motivado por el fin de conseguir materiales mejores y

más adecuados para diferentes aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones son las siguientes [14]:

CAMPO DE APLICACIÓN	APLICACIONES
Militar	Materiales de protección ligera, armadura para vehículos blindados, cascos, rodilleras, equipos de protección, chaleco antibalas, cortinas antiexplosivas.
Aeroespacial	Sistemas de protección térmica de la aeronave, correas de sujeción, conos de nariz de aeronave, remaches, absorción de sonidos y vibraciones, correas de sujeción, paneles del ala (resistencia al cizallamiento mejorada), álabes de motor.
Automoción	Sistemas de absorción de energía, protección térmica, blindaje, parachoques, asientos, cinturones de seguridad.
Deportes	Equipación de protección para impactos, rodilleras, máscaras de protección, cascos, suelas de zapatillas.
Biomedicina	Vendas inteligentes, implantes quirúrgicos, prótesis arteriales, piel artificial, revestimientos protésicos, suturas y anclajes de ligamentos y músculos, filtros, dispensadores de medicina.
Materiales compuestos	Refuerzo compuesto (mejor adhesión entre la fibra y la matriz).
Construcción	Refuerzo de muros de mampostería con una capa auxética que aumenta la resistencia del muro, cierres a presión y remaches.
Sensores y actuadores	Dispositivos y compuestos piezoeléctricos, sensores/hidrófono (mayor sensibilidad y mayor variación de la resistencia en el sensor).
Industria textil	Textiles confortables con una presión reducida en la ropa, prendas de ropa adaptativa, fibras textiles de tejido, industria de los hilos, correas de cambio de color, o tejidos.

Tabla 2.2: Aplicaciones existentes y potenciales de los materiales auxéticos.

2.3.4. Fabricación de materiales auxéticos

Debido al cada vez mayor interés que surge alrededor de este tipo de materiales, nuevos métodos de fabricación se están investigando con el objetivo, entre otros, de lograr una producción en masa de materiales auxéticos económico, que justifique su uso en aplicaciones reales frente a otro tipo de materiales.

Algunos de estos métodos de fabricación pueden verse en la Figura 2.14.

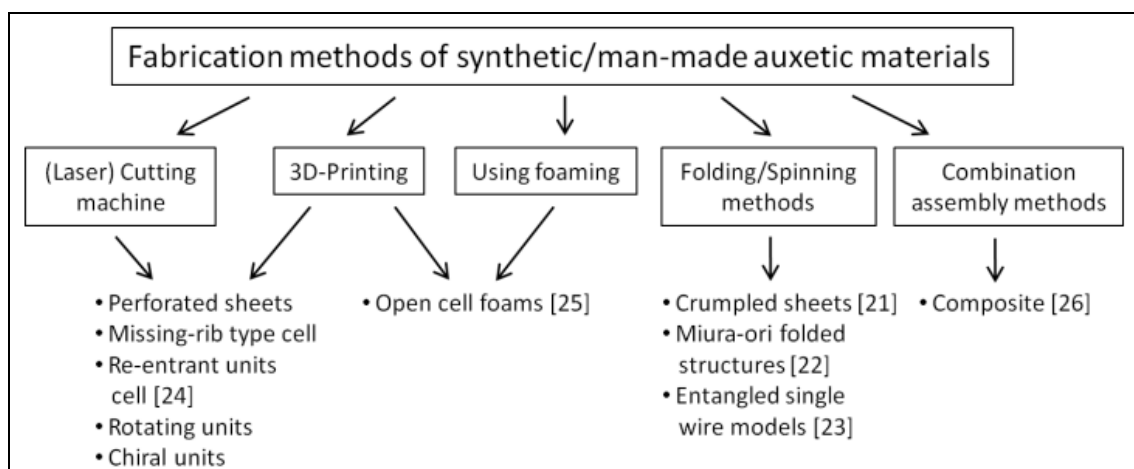


Figura 2.14: Tipos de fabricación de materiales auxéticos.

Para el desarrollo de este proyecto, se tomará en especial interés el método de fabricación aditiva o impresión 3D, el cual permitirá el diseño y construcción de sólidos reticulares.

Se le llama fabricación aditiva a cualquier proceso mediante el cual se crea un objeto tridimensional, construido mediante capas. Existen diversos tipos de tecnología aditiva: extrusión de material (FDM), polimerización VAT (SLA y DLP), fusión de polvo (SLS), inyección de material (MJ), inyección de aglutinante (BJ), deposición directa de energía (DED), laminado en hojas (SL).

2.4. INTRODUCCIÓN DE SOFTWARE

Este proyecto se desarrollará en su mayor parte mediante el uso de un software especializado de diseño en 3D, así como de una simulación estructural. Por lo tanto, es necesario tener una ligera idea de qué tipo de software se utilizará [3].

Inicialmente, el desarrollo del diseño del sistema de protección balística y de cada uno de sus componentes se realizará utilizando el software SOLIDWORKS 2020 desarrollado por Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. Este es un software CAD (Computer Aided Design) para el modelado en 2D y 3D, que funciona desde su primera versión en 1995. Con este software es posible conceptualizar, crear y validar diseños de productos sin necesidad de invertir en la creación material de un prototipo.

Tras crear el modelo parte a parte y ensamblarlo mediante el diseño 3D del software es necesario validar el diseño y evaluar su funcionalidad. Para ello, se ha usado una extensión de SOLIDWORKS para el análisis estructural: SOLIDWORKS Simulation.

SOLIDWORKS Simulation es una herramienta de análisis estructural que, mediante el uso del análisis de elementos finitos (FEA), predice el comportamiento físico real de un diseño. Este software proporciona un análisis lineal y no lineal, así como un análisis dinámico, ambos necesarios para las simulaciones que se realizarán en este estudio. Profundizando en el FEA, puede definirse como un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales asociadas a geometrías complejas. El proceso de resolución de este método comienza con la definición de la geometría mediante la generación de una malla compuesta por retículas, que a su vez están formadas por una serie de nodos donde la solución de las ecuaciones diferenciales es exacta. Estos retículos que forman la malla son los "elementos finitos".

Además, se definen las condiciones de contorno, las propiedades y los materiales que componen el objeto. Tras establecer las condiciones iniciales, se realiza la solución de las ecuaciones diferenciales y las incógnitas generadas previamente, ya pertenezcan a un problema lineal o no lineal.

3. Propuesta de diseño

En este capítulo se detallará el proceso completo, paso a paso, del estudio y diseño del prototipo del que trata este trabajo. Se explicará y justificará cada parte del proceso desde la selección de materiales y diseño de forma, hasta las simulaciones finales para el análisis de la viabilidad del prototipo

Como se ha mencionado anteriormente en la introducción, el prototipo de diseño de este proyecto consistirá en un sistema de protección balística, es decir, un escudo antibalas. Para ello, se abordará el diseño del mismo partiendo de unas bases preestablecidas:

- Primeramente, la protección debe de ser capaz de soportar el impacto de un proyectil, mínimo de un proyectil 9 mm y de calibre 40 (protección tipo IIA según el Instituto Nacional de Justicia de los EEUU), sin causar daños graves en el blanco protegido por el sistema antibalas.

NIJ Standard - 0108.01 BALLISTIC RESISTANT PROTECTIVE MATERIALS						
ARMOR TYPE	WEAPON	TEST AMMUNITION	NOMINAL BULLET MASS	SUGGESTED BARREL LENGTH	REQUIRED BULLET VELOCITY	REQUIRED HITS PER ARMOR SPECIMEN
I		22 LRHV	2.6 g	15 to 16.5 cm	320 ± 12 m/s	5
		Lead	40 gr	6 to 6.5 in	1050 ± 40 ft/s	5
		38 Special RN Lead	10.2 g	15 to 16.5 cm	259 ± 15 m/s	5
II-A		357 Magnum JSP	10.2 g	10 to 12 cm	381 ± 15 m/s	5
		9 mm FMJ	8.0 g	10 to 12 cm	1250 ± 50 ft/s	5
		9 mm FMJ	124 gr	4 to 4.75 in	332 ± 12 m/s	1090 ± 40 ft/s
II		357 Magnum JSP	10.2 g	15 to 16.5 cm	425 ± 15 m/s	5
		9 mm FMJ	158 gr	6 to 6.5 in	1395 ± 50 ft/s	5
		9 mm FMJ	8.0 g	10 to 12 cm	358 ± 12 m/s	5
III-A		44 Magnum Lead SWC	15.55 g	14 to 16 cm	426 ± 15 m/s	5
		Gas	240 gr	5.5 to 6.25 in	1400 ± 50 ft/s	5
		Checked 9 mm FMJ	8.0 g	24 to 26 cm	426 ± 15 m/s	5
III		7.62 mm Winchester FMJ	9.7 g	56 cm	838 ± 15 m/s	5
		308 Winchester FMJ	150 gr	22 in	838 ± 15 m/s	5
IV		30-06 AP	10.8 g	56 cm	838 ± 15 m/s	1
			166 gr	22 in	2850 ± 50 ft/s	1

Figura 3.1.: NIJ Standard – 0108.01. Resistencia balística de los materiales.

- En segundo lugar, se implementará la tecnología auxética para el desarrollo de la estructura de absorción de impactos del prototipo de protección balística.
- En tercer lugar, se implementará la fabricación aditiva para la fabricación de la estructura de protección.
- En cuarto lugar, se tendrá en cuenta a la hora de la selección de materiales y estructuras, intentar lograr un peso del prototipo lo más ligero posible debido a las posibles aplicaciones a la que está destinado.

Tomando esto como premisa, se iniciará este diseño con la selección y estudio de la estructura del sistema de protección.

3.1. ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO DE PROTECCIÓN BALÍSTICA

La estructura del prototipo antibalas será una estructura compuesta por dos elementos principales: una capa blindada encargada de evitar que el proyectil avance y alcance el objetivo y una capa de material auxético encargada de absorber el impacto del proyectil y distribuir la energía a lo largo de su estructura evitando así daños en el blanco.

3.1.1. Capa de protección blindada

Debido a la necesidad de crear sistemas de protección balística sobre todo en el ámbito de defensa y cuerpos de seguridad, existen y surgen cada vez más diferentes tipos de sistemas de protección y de materiales blindados.

Los grupos principales de materiales usados típicamente como protección antibalas son los siguientes:

GRUPOS	MATERIALES MÁS COMUNES	APLICACIONES
Metales y aleaciones de metales	Aceros, aleaciones de Al, aleaciones de Mg, aleaciones de Ti.	Blindajes monolíticos, blindajes compuestos, blindajes pasivos de plataformas.
Cerámicos	Alúmina, carburo de silicio, circonia, nitruro de silicio, carburo de boro, nitrito de aluminio, diboruro de titanio.	Motores diésel ligeros y pesados, turbinas de gas, mecanizado fundición, matrices de extrusión, blindaje antibalas.
Materiales compuestos	Matriz polimérica reforzado con fibras. Fibra de arámida o kevlar, fibra de vidrio, nylon, poliéster, HS Carbono, HS Polietileno.	Parachoques de vehículos, cascos de motoristas, chalecos antibalas.
Vidrios	Cristal, polivinilo butiral, poliuretano, policarbonato.	Cristales de vehículos blindados, habitaciones de seguridad.
Hormigones	Hormigón en masa, armado, con fibras, con mallas.	Construcción de edificios y estructuras civiles.

Tabla 3.1.: Materiales para protección balística y anti-impactos y aplicaciones.

Como se ha comentado anteriormente, la función de esta primera capa será evitar que el proyectil, o los fragmentos del mismo, alcancen el objetivo. Para ello, el material que se emplee ha de ser lo suficiente duro para soportar grandes cantidades de energía distribuidas de manera puntual durante un periodo muy corto de tiempo.

Los materiales cerámicos son una familia de materiales pétreos, con propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación en esta capa, estas son:

- Alta resistencia a la compresión.
- Módulo elástico elevado.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Bajo peso específico (en comparación con materiales metálicos).

Sin embargo, también presentan ciertas desventajas:

- Baja resistencia a tracción y flexión.
- Baja resistencia a la fractura.

Debido a la aplicación a la que está destinada esta capa (detener un proyectil), la fuerza que predominará será la de compresión. Por otro lado, la baja resistencia a la fractura

supone un inconveniente, ya que podría permitir el paso de fragmentos de proyectil y cerámicos tras un impacto, pudiendo dañar el objetivo del proyectil. Por ello, para poder usar este tipo de materiales en un blindaje, es necesario instalar una placa posterior de un material dúctil, capaz de retener estos fragmentos, tal como acero para blindajes o aluminio. En este caso, el material elegido para esta placa posterior será aluminio 7050-T7451. Este tipo de aluminio presenta una alta resistencia, alta resistencia a la fractura y a la fractura.

A pesar de este inconveniente, los materiales cerámicos presentan una eficiencia balística bastante superior a los materiales metálicos según los experimentos de DOP.

Por estos motivos, se empleará en este proyecto un material de la familia de los cerámicos para la fabricación de la primera capa del sistema de protección.

Los tres cerámicos principales a considerar para esta aplicación son: alúmina (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC) y carburo de boro (B_4C).

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm^3)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)
Al_2O_3	3.60 – 3.90	1980 - 4100	185 - 500	230 – 410
SiC	3.18	3800	420	415
B_4C	2.5	2200	400	400

Tabla 3.2.: Tipos principales de cerámicos y sus propiedades.

De estos tres materiales, el carburo de boro es el cerámico que presenta mejores propiedades balísticas, sin embargo, presenta así mismo un coste muy elevado en comparación con los otros dos, por lo cual no se considera apropiado para una aplicación tan exigente como a la que está destinado este proyecto, en la cual podría ser necesario su sustitución de forma periódica, dependiendo la frecuencia uso a la que se someta.

Entre la alúmina y el carburo de silicio, el carburo de silicio presenta mejor eficiencia másica, pero sigue siendo más costoso que la alúmina. Por otro lado, una alúmina con alta pureza (92 - 99%), proporciona una buena relación de eficiencia balística / coste [19].

Por tanto, teniendo en cuenta lo anterior, el cerámico seleccionado será la alúmina debido a su mejor eficiencia.

Una vez seleccionado el material, es necesario definir la composición del mismo, ya que dependiendo de su pureza presentará distintas propiedades. Para ello, se tomará como referencia el estudio experimental llevado a cabo por M. V. Silva et al. [20]. En este ensayo se comparan distintos tipos de alúmina, variando su pureza, y se llega a la conclusión que la alúmina con una pureza del 92 % (A92) presenta una mayor dureza y menor porosidad que el resto. Una placa de 12 mm de A92, es capaz de detener un proyectil de nivel IV (865 m/s, >4000 J) según “Standard NIJ-0108.01” sin penetrar o deformar la placa metálica posterior, lo cual cumple con todas las premisas establecidas para la realización de este trabajo. De cualquier forma, con el fin de asegurar la fiabilidad del material ante una posible fractura, se podría definir una probabilidad de fractura por medio del método de Weibull [21]:

$$P = 1 - e^{\left[\left(\frac{v}{v_0}\right)^m \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right]} \quad (3.1)$$

Donde v es la cantidad de materiales testeados, v_0 es la cantidad estándar, m es el módulo de Weibull, σ es la resistencia a la tensión, σ_0 es el parámetro de ajuste y σ_u Es la menor resistencia en la que la probabilidad de fractura es cero.

A modo de conclusión y resumen de este apartado 3.1.1., se aplicará al diseño de este prototipo de protección balística una primera capa compuesta por una placa anterior de alúmina con una pureza del 92 % y 12 mm de grosor, junto a una placa posterior de aluminio 7050-T7451 de 2 mm de espesor, como elemento adicional de seguridad en caso de desprendimiento de fragmentos.

3.1.2. Capa de estructura auxética

La función principal de esta capa de protección, será amortiguar y absorber la energía generada por el impacto del proyectil sobre la primera capa de protección. Por este motivo, se ha escogido los materiales del tipo auxético para esta función, ya que como se ha visto en el Capítulo 2, este tipo de materiales debido a su coeficiente de Poisson negativo presentan un mejor comportamiento para la absorción de impactos que los materiales convencionales.

La estructura auxética seleccionada para este propósito se trata de una estructura reticular 3D, con una configuración reentrante en panel. Este tipo de configuración presenta una serie de ventajas, como son su baja densidad estructural y su sencillez de fabricación en comparación al resto de materiales auxéticos. Para definir geoméricamente la estructura de este material, se tomará como guía el ensayo experimental llevado a cabo por M. Shokrirad et al. [22], en el cual se analizan y comparan diferentes estructuras reentrantes con respecto a la absorción de energía que proporcionan. Partiendo como factor principal para la selección de la estructura el valor de la absorción de energía específica (SAE);

$$EA(d) = \int_0^d F(\delta) d\delta \quad (3.2)$$

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (3.3)$$

donde d representa la distancia de aplastamiento y δ la distancia de desplazamiento, se llega a la conclusión que la estructura más apta para la aplicación en el prototipo de este proyecto será la estructura mostrada en las Figuras 3.2., 3.3. y 3.4.

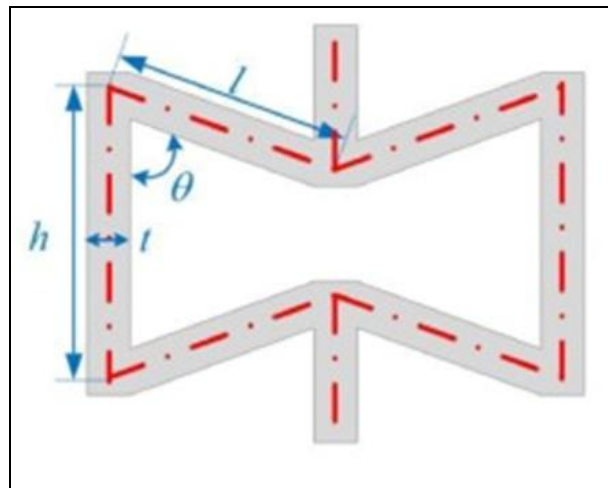


Figura 3.2.: Esquema de celda de estructura auxética reentrante.

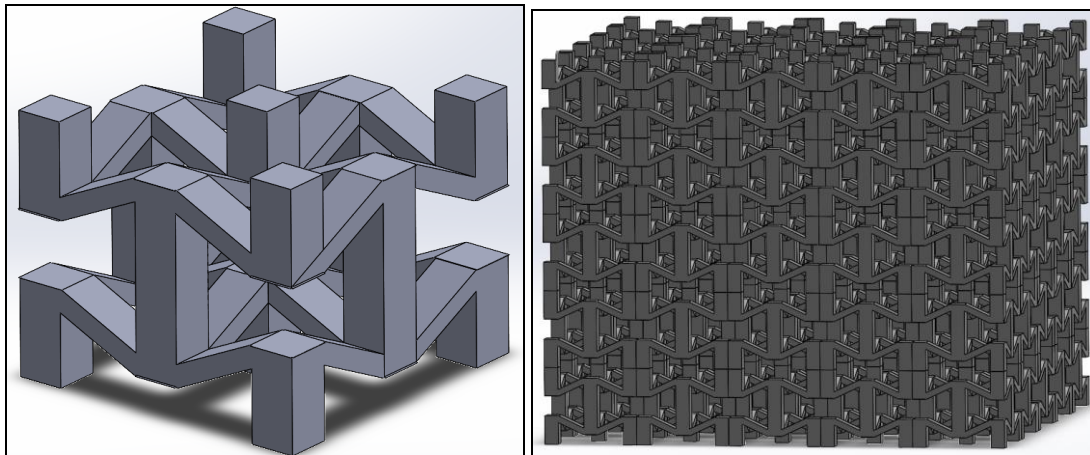


Figura 3.3.: (a) Celda de estructura auxética reentrante. (b) Estructura celular auxética reentrante.

Los valores geométricos de la estructura reentrante mostrada en la Figura 3.2. se corresponderán con los de la Tabla 3.3. Estos valores se han escogido teniendo en cuenta los valores óptimos para el diseño teniendo en cuenta la resistencia frente a una carga de compresión, como se mostrará más adelante en este capítulo.

h	7.4 mm
l	5.7 mm
θ	65°
t*	1.8 mm

Tabla 3.3.: Especificación geométrica de la celda auxética.

* En el caso de las vigas reentrantes, en lugar de tener una sección de 1.8x1.8 mm, presentarán una sección de 1.8x0.9mm, tal y como se muestra en la Figura 3.3.(a).

Para la fabricación de esta estructura de panal se empleará el compuesto Onyx ESD implementado mediante fabricación aditiva. Este es un material compuesto de base de nylon relleno de microfibras de carbono. Este tipo de material posee excelentes propiedades mecánicas, necesarias para la fabricación de este prototipo (Anexo A).

Por otro lado, para definir las propiedades mecánicas que presentará la estructura propuesta y conocer su comportamiento ante la aplicación de cargas sobre la estructura,

previamente a las simulaciones de elementos finitos, se puede realizar una modelización de la estructura reentrante.

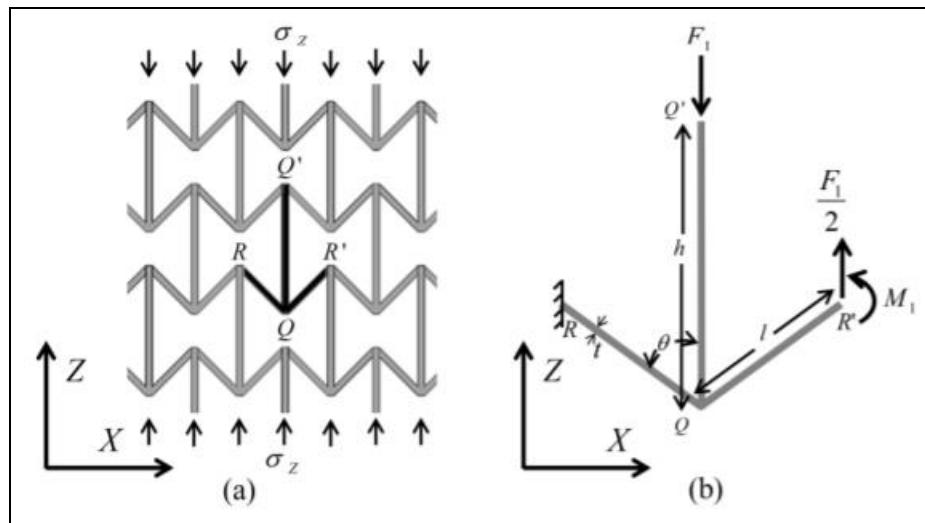


Figura 3.4.: Estructura reentrante auxética con una carga aplicada de compresión.

Como se aprecia en la Figura 3.2., se trata de una estructura en el eje X y en el eje Y, por tanto, es posible simplificar la modelización de la estructura a un sistema 2D para el análisis. De esta forma, siguiendo con la nomenclatura de la Figura 3.3., se puede obtener el valor del coeficiente de Poisson de la estructura en el eje Z, bajo una fuerza de compresión en el mismo eje, de la siguiente manera:

$$\nu_{zx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = \frac{\frac{\Delta x}{2l \sin \theta}}{\frac{\Delta y}{h - l \cos \theta}} = -\frac{h - l \cos \theta}{2l \sin \theta} \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (3.4)$$

De esta ecuación, se debe tener en cuenta que, cuanto menor es el ángulo reentrante θ , mayor se vuelve el coeficiente de Poisson y por el contrario, cuanto mayor es el ángulo θ , “más auxética” se vuelve la estructura (Figura 3.5).

Por otro lado, el módulo elástico en el eje Z será:

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{\frac{4F_1}{(2l \cos \theta)^2} F_1 (h - l \cos \theta)}{\frac{\Delta z}{h - l \cos \theta} \Delta z l^2 \sin^2 \theta} \quad (3.5)$$

Donde E_s y G_s representan el módulo de Young y el módulo de cizallamiento del material que compone la estructura, I es el momento de inercia, A representa el área de la sección transversal y

$$\Delta_x = \frac{F_1(l-2\Delta l)^3 \sin\theta \cos\theta}{12E_s I} - \frac{F_1(l-2\Delta l) \sin\theta \cos\theta}{E_s A} + \frac{6F_1(l-2\Delta l) \sin\theta \cos\theta}{5G_s A} \quad (3.6)$$

$$\Delta_z = \frac{F_1(l-2\Delta l)^3 \sin^2\theta}{24E_s I} + \frac{F_1(l-2\Delta l) \cos^2\theta}{2E_s A} + \frac{3F_1(l-2\Delta l) \sin^2\theta}{5G_s A} + 2 \frac{F_1(h-2\Delta h)}{E_s A} \quad (3.7)$$

A partir de la ecuación 3.5 se puede deducir que, cuanto mayor es la relación h/l y menor es el ángulo θ , mayor es el módulo elástico (Figura 3.6).

Dado que la aplicación de esta estructura es absorber la energía de los impactos de proyectiles, la gran mayoría de cargas serán de compresión en el plano ZX, por tanto, no será necesario en principio analizar el comportamiento de la estructura en el plano XY. Sin embargo, sí es interesante conocer la resistencia de compresión que presentará la estructura. Para ello, se tomará como referencia el estudio de Yang et al. [23]:

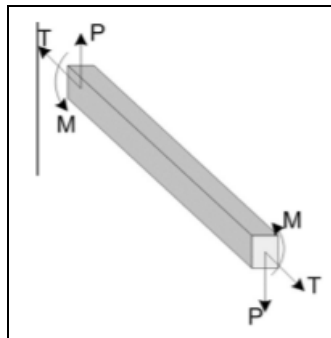


Figura 3.5.: Cargas sobre pilar de la estructura auxética.

Partiendo de la tensión de Von Misses,

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \quad (3.8)$$

donde σ y τ son las tensiones normal y cortante respectivamente y σ_1 es la tensión principal, la cual siempre mantendrá $\sigma_1 < \sigma_y$ (límite elástico del material).

En el caso en el que la tensión principal alcance el valor crítico del límite elástico, se obtiene el valor de la fuerza máxima de compresión (F_z):

$$\frac{\left(\sigma_y^2 - \frac{9F_z^2 \sin^2 \theta}{64t^4}\right)t^3}{4\sigma_y} - \frac{F_z^2 \cos^2 \theta \sigma_y}{\left(64\sigma_y^2 - \frac{9F_z^2 \sin^2 \theta}{t^4}\right)t} = \frac{F_z L}{8} \sin \theta \quad (3.9)$$

Y la resistencia de compresión de la estructura auxética resultante, sería la siguiente:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2L^2 \sin^2 \theta} \quad (3.10)$$

En esta ecuación se considera únicamente los pilares reentrantes de la estructura, no los verticales, los cuales podrían también sufrir un fallo elástico por pandeo.

Hay que tener en cuenta que, a medida que θ aumenta, disminuye a su vez la resistencia de la estructura. Por otro lado, para θ más pequeños, la estructura será más propensa al fallo elástico por pandeo, ya que la relación entre las longitudes h/l aumenta. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que la relación entre θ y la relación h/l será de gran influencia en las propiedades mecánicas que presentará la estructura. Esta influencia se puede observar de forma clara en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7.

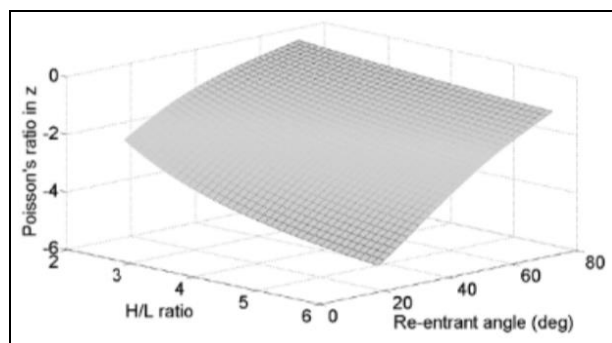


Figura 3.6.: Grafico coeficiente de Poisson.

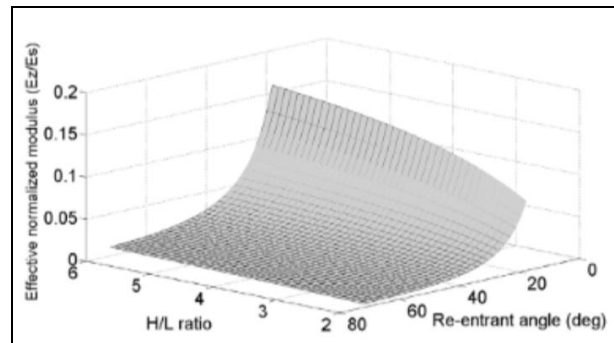


Figura 3.7.: Gráfico módulo elástico.

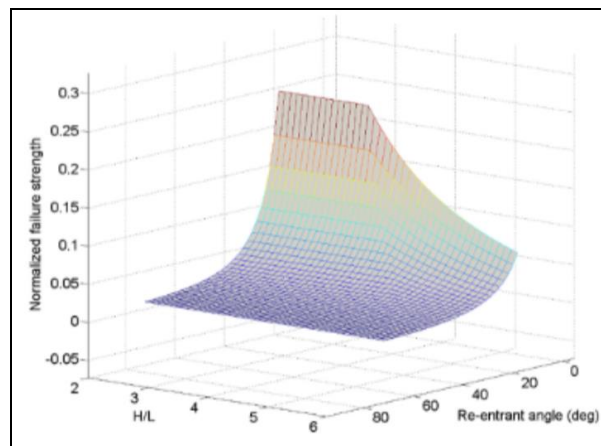


Figura 3.8.: Gráfico resistencia a la fractura.

3.1.3. Diseño compuesto final del prototipo de protección balística

El diseño final del prototipo de protección balística estará formado por la combinación de las dos capas descritas en los apartados anteriores. Con relación a la trayectoria del proyectil, primero impactará en la capa de alúmina, seguidamente a esta se encontrará la capa de aluminio, encargada de detener los posibles fragmentos de proyectil o de alúmina, y por último estará la capa de estructura auxética con configuración reentrante en forma de panel, encargada de absorber la energía del impacto (Figura 3.8).

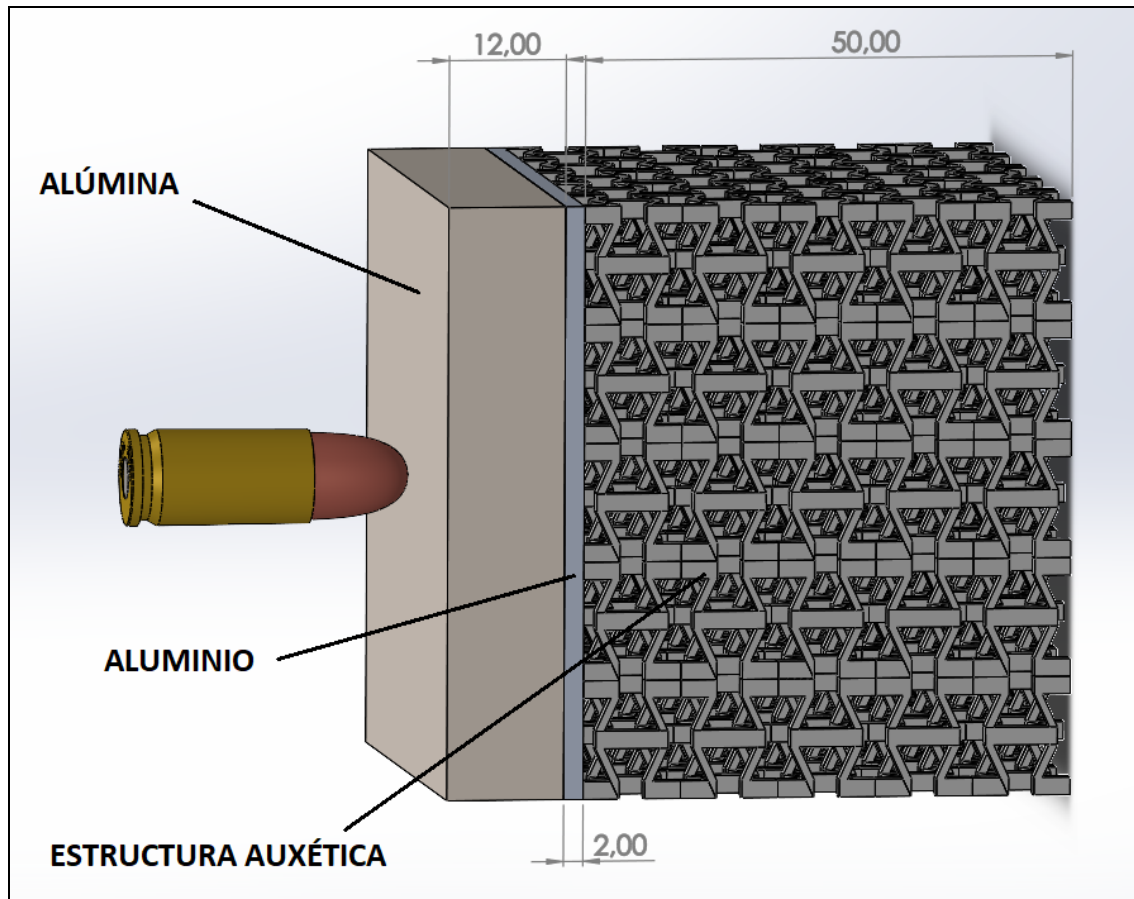


Figura 3.9.: Esquema de las capas del sistema de protección.

La densidad de los distintos elementos que componen este sistema de protección son:

- Alúmina: 3.96 g/cm^3
- Aluminio 7050-T7451: 2.83 g/cm^3
- Onyx ESD: 1.2 g/cm^3

Por lo que se obtendría una densidad final de la estructura completa de:

- Sistema de protección balística: 2.6138 g/cm^3

3.2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PROTOTIPO

Para el estudio y validación de este sistema de protección se han realizado dos tipos de simulación mediante el software de simulaciones de Solidworks; primeramente, una simulación de fuerzas estáticas sobre la estructura auxética, sometida a diferentes fuerzas de compresión. Con esta simulación, se podrá observar cómo se comporta la estructura ante fuerzas de compresión. Y en segundo lugar, se realizarán simulaciones

de fuerzas dinámicas no-lineares sobre el prototipo completo. De esta forma, se podrá simular de forma más precisa el efecto que tiene el impacto de un proyectil sobre el prototipo.

Sin embargo, antes de comenzar con las simulaciones de la estructura, se ha realizado una rápida simulación estática sobre una celda unitaria de la estructura auxética con el fin de observar cuáles serán los puntos de mayor tensión debido a fuerzas de compresión.

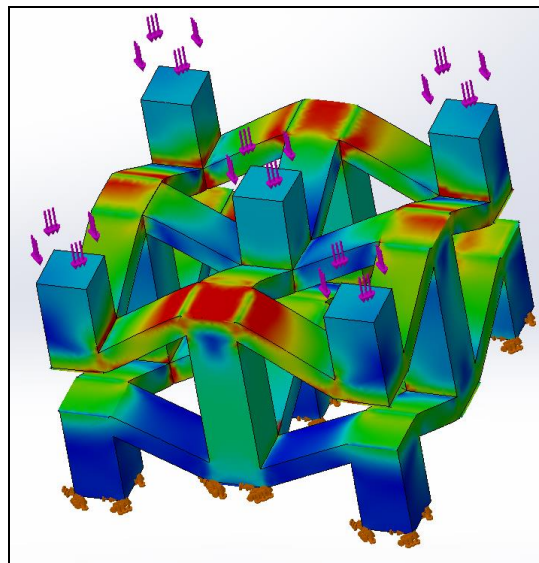


Figura 3.10.: Tensión en celda.

Los puntos de mayor tensión serán por tanto, los cuatro vértices superiores de la estructura reentrante.

3.2.1. Simulación de fuerzas estáticas de compresión de la estructura auxética

En estas simulaciones de la estructura auxética reentrante se analizará el comportamiento de la misma bajo cargas de compresión. Irán desde los 100 N hasta los 500 N de fuerza de compresión con un incremento de 100 N por simulación, haciendo un total de 5 simulaciones. Para ello, tomaremos un volumen de control de la estructura de 14.17 cm³.

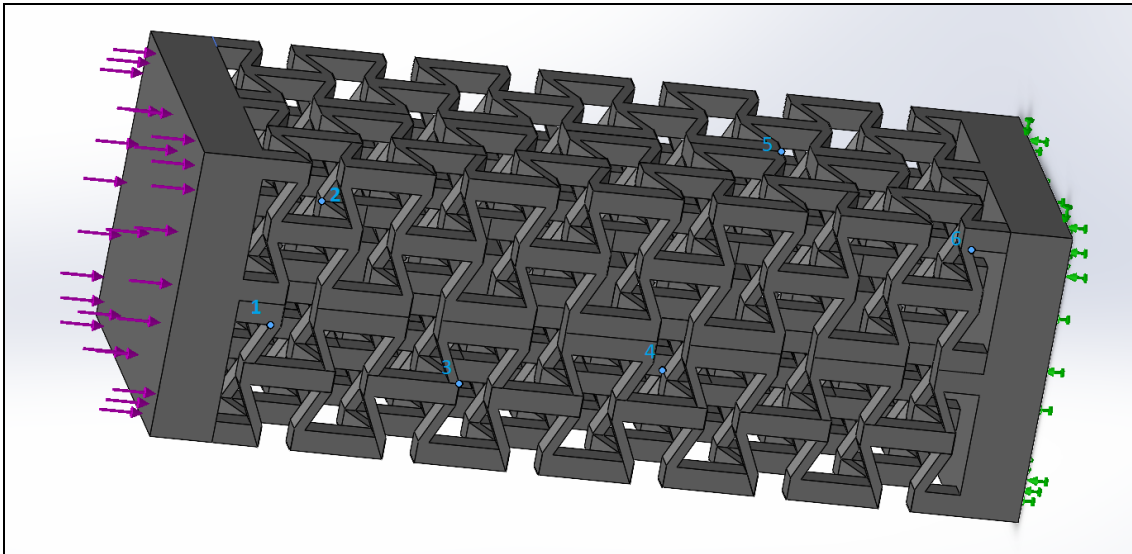


Figura 3.11.: Volumen de estructura para simulación.

Como se puede apreciar en la Figura 3.10., el volumen para la simulación consistirá en una estructura reentrante auxética entre dos placas del mismo material, las cuales una servirá para anclar la estructura y sobre la otra se aplicará la fuerza de compresión correspondiente. A lo largo de la estructura se han seleccionado seis diferentes nodos de forma aleatoria para analizar las fuerzas de von Mises que sufrirá la estructura en las cinco simulaciones.

Tras realizar las simulaciones, se han obtenido los siguientes desplazamientos máximos por simulación que aparecen en la Tabla 3.4.

SIMULACIÓN	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)
100 N	0.436040
200 N	0.872080
300 N	1.3081
400 N	1.7442
500 N	2.1801

Tabla 3.4.: Desplazamientos máximos de las simulaciones.

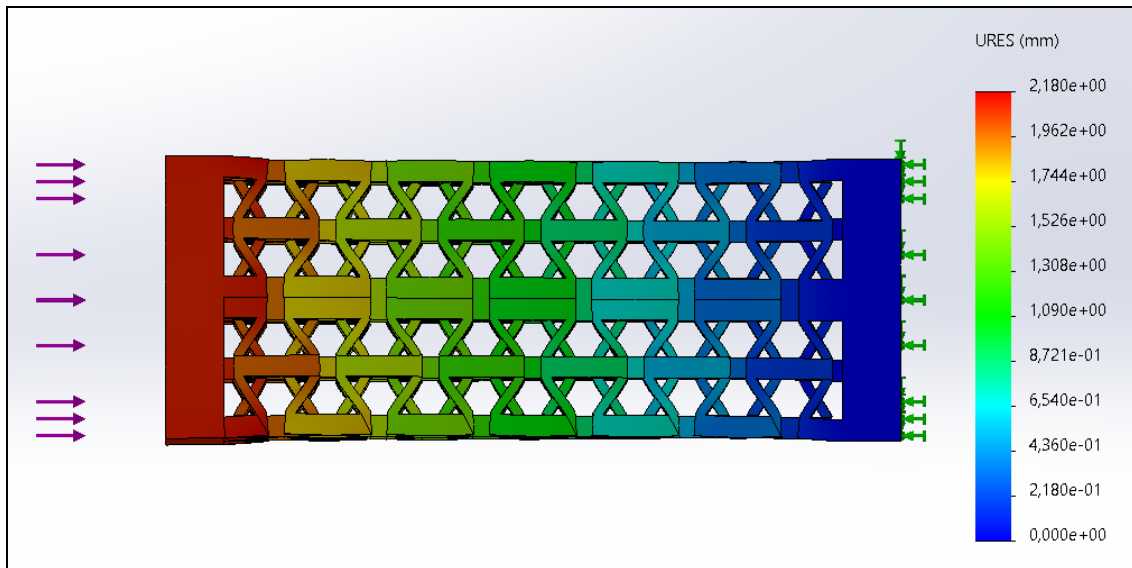


Figura 3.12.: Desplazamientos de simulación de 500 N.

En la Figura 3.11., donde se muestra la distribución de desplazamientos para una fuerza de compresión de 500 N, se puede apreciar el comportamiento propio de una estructura auxética. Esta estructura sometida a una fuerza de compresión sufre una disminución de la sección transversal, al contrario de cualquier material convencional (Coeficiente de Poisson > 0) cuya sección transversal tiende a aumentar. Esto se traduce en una mayor resistencia a la indentación y una mayor absorción de energía.

Por otro lado, en la gráfica de la Figura 3.12., se puede apreciar la distribución del estrés von Mises a lo largo de la estructura en los diferentes nodos seleccionados aleatoriamente.

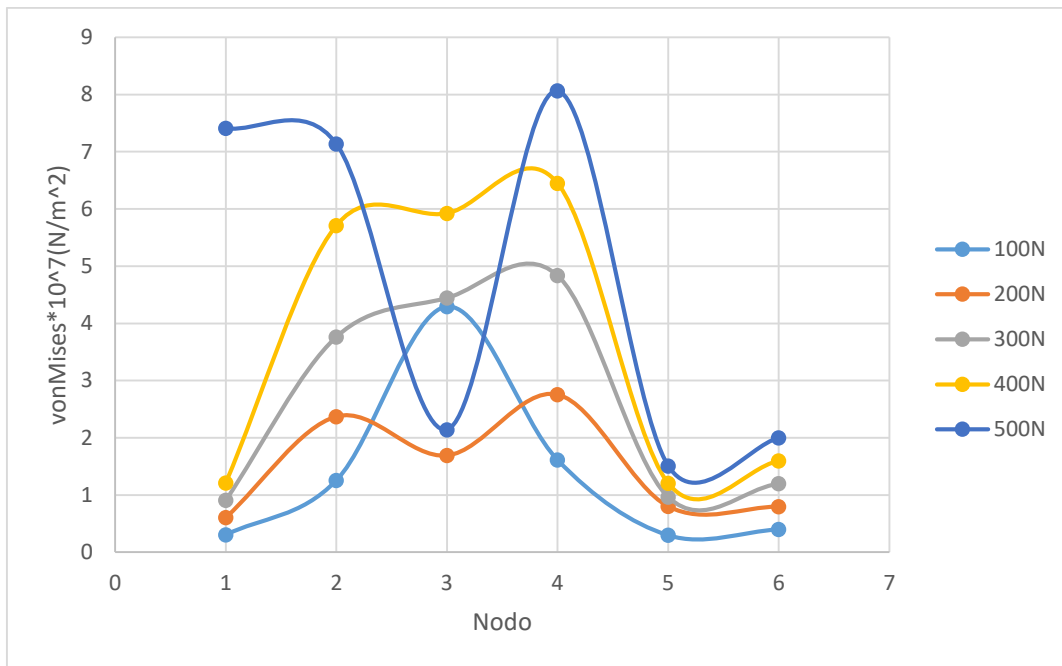


Figura 3.13.: Distribución vonMises en nodos.

En el gráfico se aprecia una distribución similar en todas las simulaciones, con picos máximos en los nodos 2 y 4, y una disminución significativa en el nodo 3. Además, presentará los valores mínimos en los extremos de la estructura, teniendo los valores máximos en la parte central. Dado que cada nodo presenta una posición diferente en la estructura reentrante, puede deducirse el comportamiento que presentará la estructura en cada localización de la misma y cómo soportará las fuerzas de compresión que se le aplican.

3.2.2. Simulación dinámica de impacto de proyectil sobre el prototipo

Se ha llevado a cabo una simulación dinámica para este análisis debido a que, a diferencia del estudio estático, no se dispone de cargas constantes, ni se aplican durante un periodo largo de tiempo. Por ello, es necesario analizar la velocidad y aceleración de cada partícula, además de tener en cuenta las fuerzas de inercia generadas en la estructura. Estas simulaciones dinámicas se basan en el estudio de frecuencia.

Para las simulaciones de impacto de proyectil sobre el sistema de protección completo, se realizarán cuatro simulaciones con cuatro tipos distintos de proyectil, los cuales se

especifican en la Tabla 3.5. junto con el peso y la velocidad de salida utilizados como parámetros para los análisis de impacto.

SIMULACIÓN	PROYECTIL	PESO (g)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)
1	9×19mm Parabellum	8	360
2	.44 Magnum	15.6	436
3	7.62×51mm NATO	9.6	847
4	.30-06 Springfield	10.8	878

Tabla 3.5.: Projectiles para las simulaciones.

Para comenzar con las simulaciones, se ha seleccionado el mismo volumen de sistema de protección balística en todas ellas (Figura 3.13), fijando el extremo derecho de la estructura auxética y permitiendo un desplazamiento de 10 mm del proyectil en dirección a la estructura, partiendo de la posición inicial mostrada en la Figura 3.13 y aplicando el peso y velocidad correspondiente a cada proyectil. Se ha presupuesto que el proyectil no penetrará la capa de protección de alúmina.

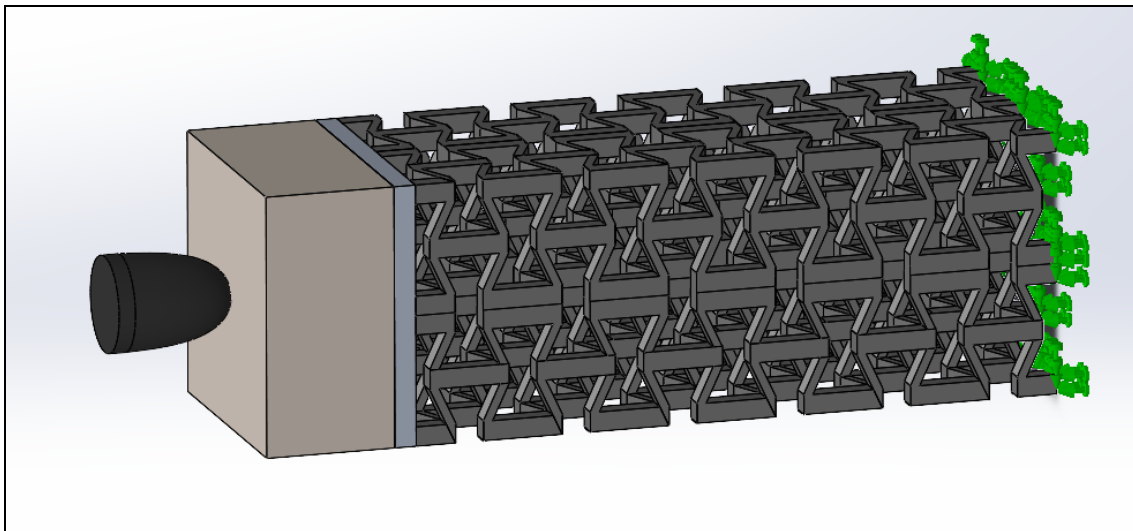


Figura 3.14.: Estructura de partida para simulación de impacto.

Y tomando como valores de cálculo para el análisis de elementos finitos los siguientes:

- Stepping time: 0.0005

- Incremento de tiempo: 0.000005
- Tamaño de elementos que componen la malla: 1mm

Para el análisis del comportamiento de la estructura ante el impacto de los proyectiles, se registrarán los resultados más relevantes para el estudio. Estos son:

- Tensiones von Mises en el punto de impacto del proyectil.
- Tensiones von Mises en la estructura auxética.
- Desplazamientos de la estructura completa debido al impacto.

RESULTADOS DE SIMULACIONES:

- Tensiones von Mises en el punto de impacto del proyectil:

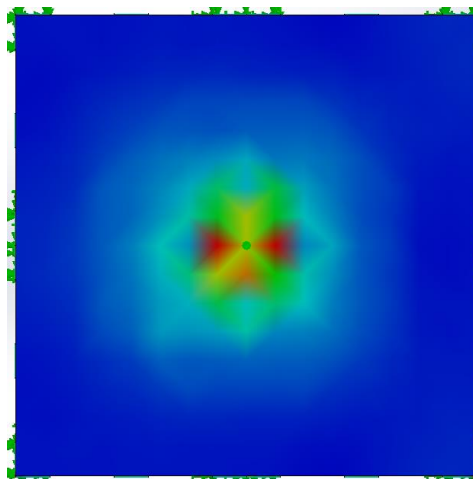


Figura 3.15.: Punto de impacto

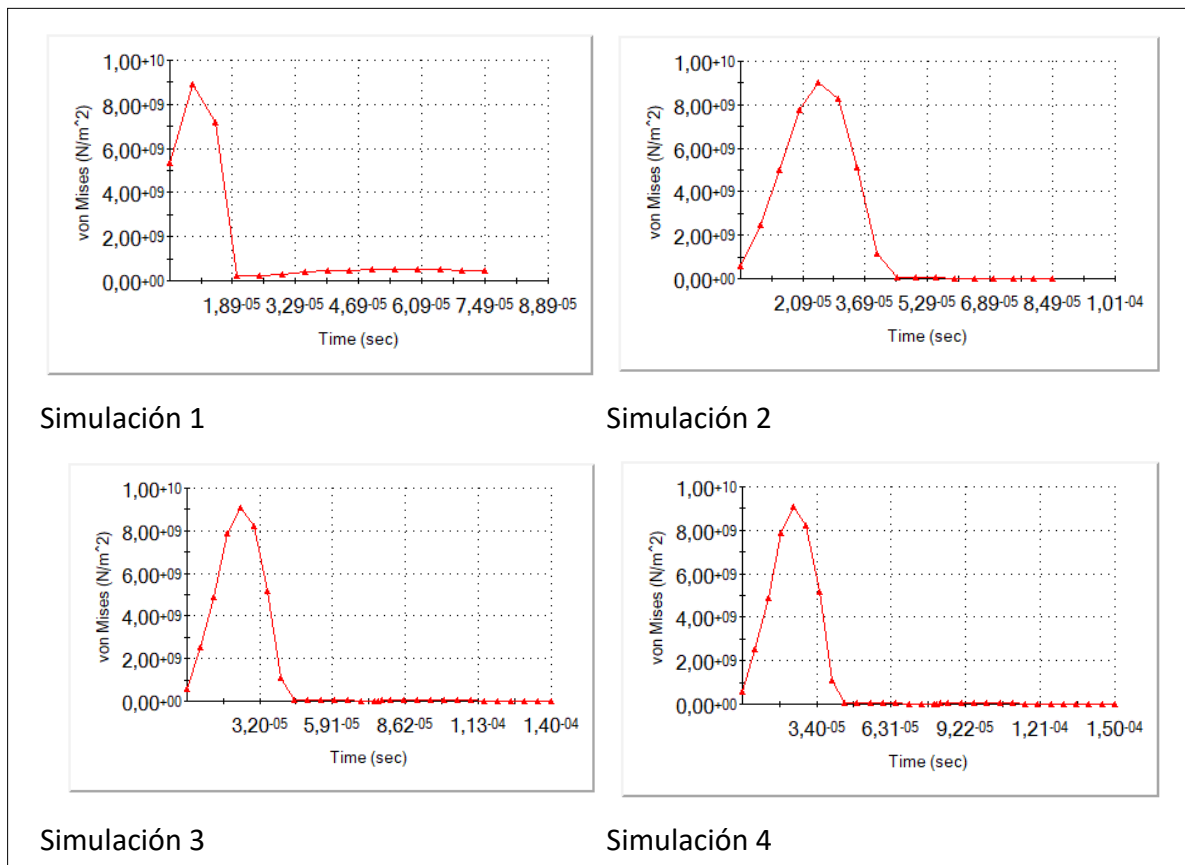


Figura 3.16.: Tensiones von Mises en punto de impacto.

Debido a que la posición del proyectil al inicio de la simulación se encuentra ya en contacto con la placa de alúmina, el pico de tensión del impacto se produce prácticamente al instante.

Los valores de tensión aumentan en cada simulación, moviéndose en un margen entre $8 \times 10^9 - 1 \times 10^{10}$ N/m².

- Tensiones von Mises en la estructura auxética:

Para adquirir una mejor idea de cómo se comporta la estructura tras el primer momento del impacto, se presentan a continuación cuatro imágenes por simulación que describen el proceso desde un momento inicial, en el que impacta el proyectil, hasta el momento final de la simulación.

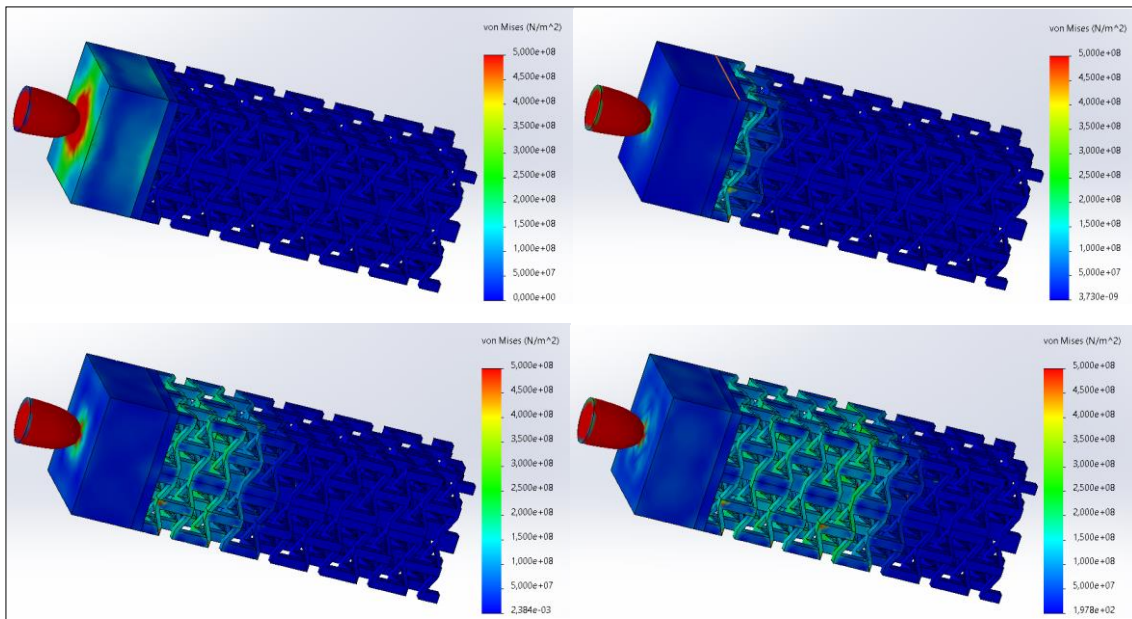


Figura 3.17.: Von Mises en Simulación 1.

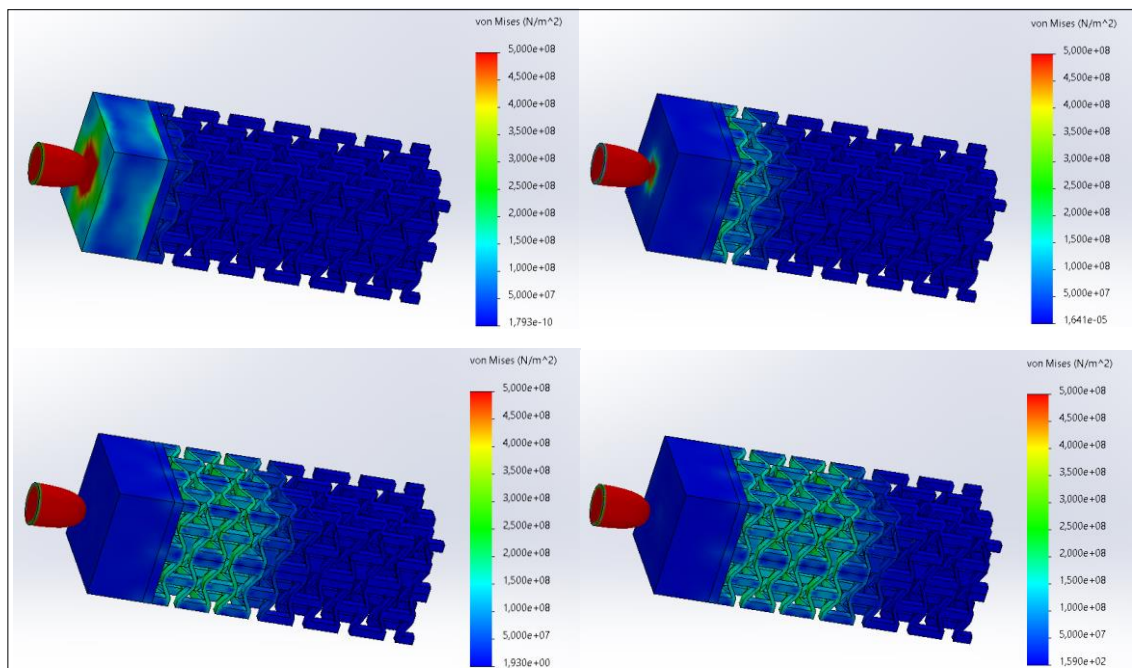


Figura 3.18.: Von Mises en Simulación 2.

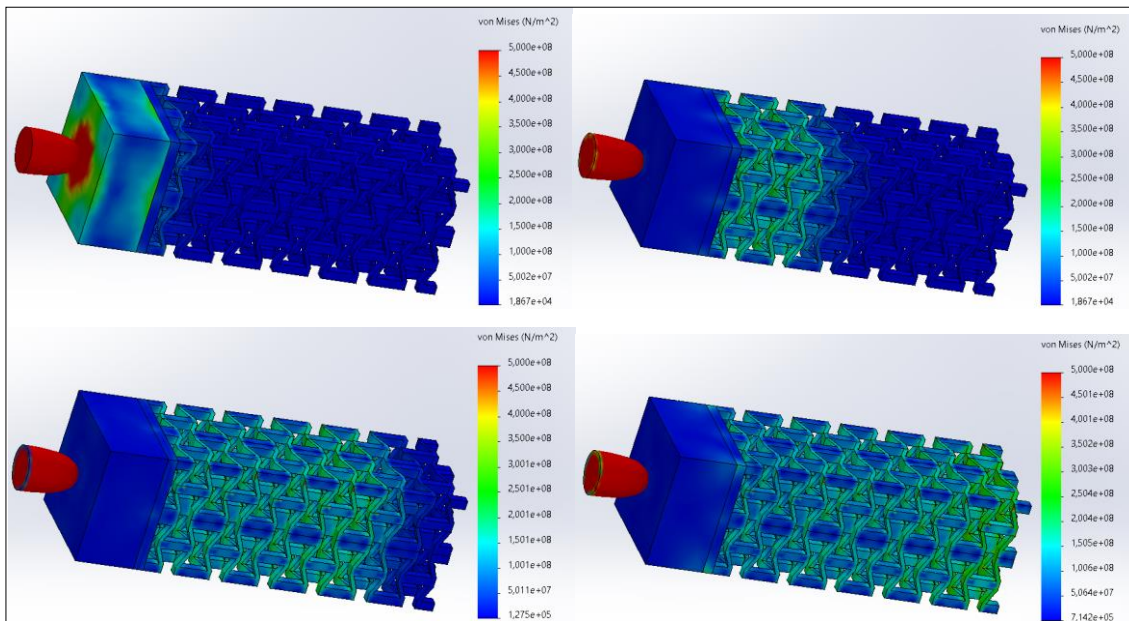


Figura 3.19.: Von Mises en Simulación 3.

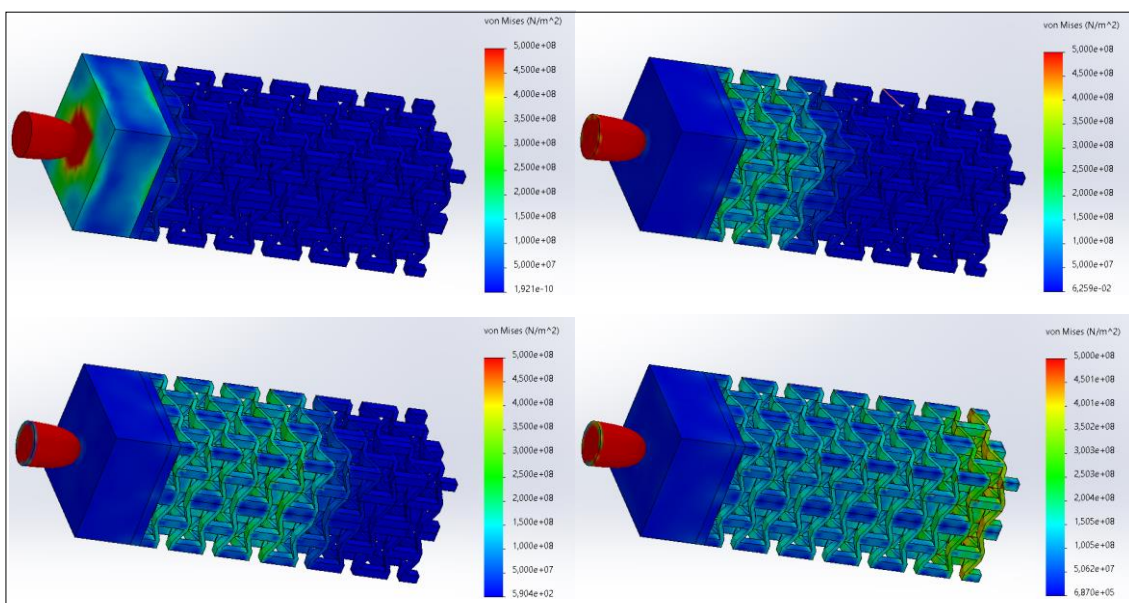


Figura 3.20.: Von Mises en Simulación 4.

Tras analizar las Figuras anteriores del proceso de absorción de impacto de la estructura auxética, se puede observar que, tanto en la simulación de una bala 9 mm y una .44 Magnum (Simulación 1 y 2 respectivamente), la transmisión de tensiones no llega en ninguno de los dos casos a alcanzar la base de la estructura, es decir, al blanco del proyectil. Por tanto, se podría decir que el diseño de la estructura es válido para el propósito al que está destinado, ya que la estructura absorbe la energía del impacto.

Sin embargo, en los casos de los proyectiles NATO y Springfield (Simulación 3 y 4 respectivamente), la estructura no es capaz de soportar por sí misma la energía de impacto del proyectil, la cual se transmitiría al blanco, si bien es cierto que parcialmente amortiguada. Aun así, no se podría validar el sistema de protección como efectivo para estos dos últimos casos.

Para definir de una forma más precisa el comportamiento de la estructura, se presentan en la Figura 3.18. cuatro gráficos correspondientes cada uno de ellos a cada una de las simulaciones. En los gráficos se muestra la distribución de tensiones durante el impacto de tres puntos diferentes, situados en la estructura a lo largo del eje de impacto, uno situado inmediatamente a continuación de la capa de aluminio, el segundo situado en la mitad de la estructura auxética y el último situado al final de la estructura, donde entraría en contacto con el blanco.

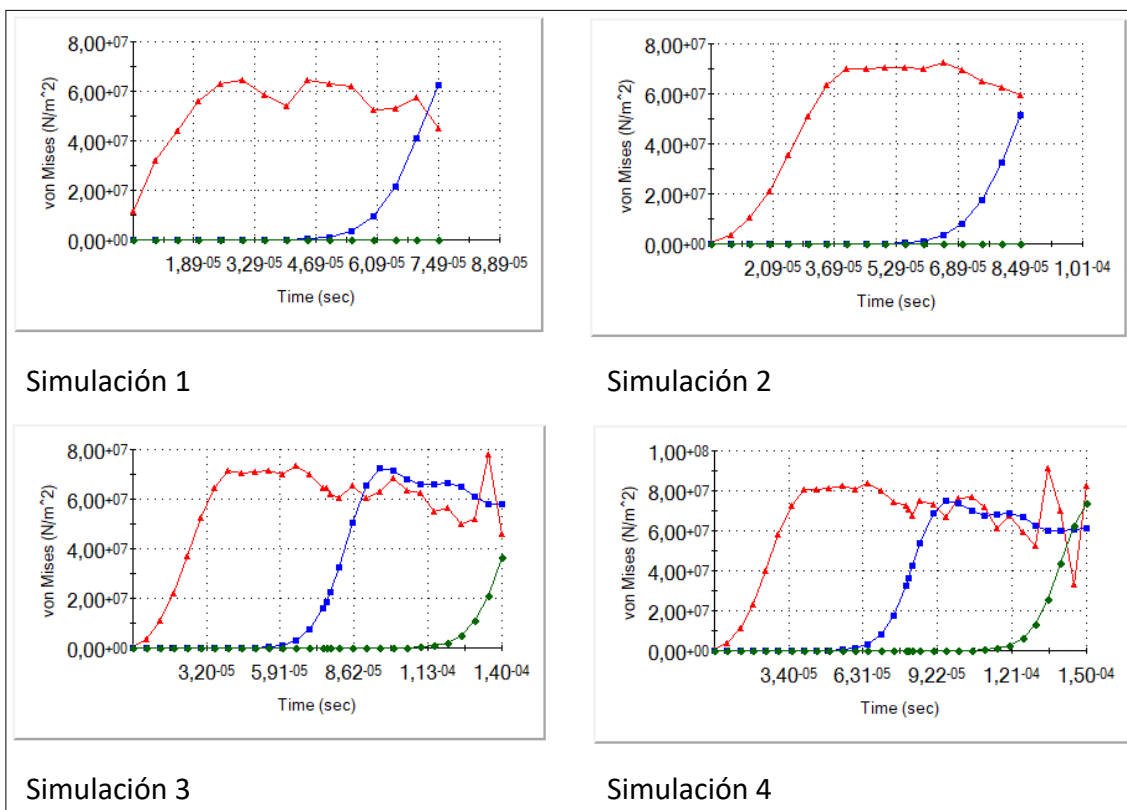


Figura 3.21.: Gráficos Von Mises/Tiempo de simulaciones.

- Nodo colindante con capa de aluminio.
- Nodo en mitad de estructura auxética.
- Nodo colindante con objetivo de proyectil.

Analizando los gráficos de la Figura 3.18. se puede confirmar la conclusión a la que se ha llegado anteriormente. En el caso de las dos primeras simulaciones, la línea correspondiente al último nodo (verde), tiene un valor prácticamente nulo durante el impacto, lo cual indica que la energía del impacto es absorbida por la estructura y no llega a afectar al objetivo.

En la línea azul, correspondiente al nodo central, se puede apreciar el tiempo que tarda la energía generada por el proyectil en recorrer la mitad estructura, que es del orden de 10^{-5} segundos.

Por último, se puede apreciar en las dos últimas simulaciones cómo la transmisión de tensiones llega al último nodo, lo cual confirma la conclusión a la que se ha llegado con anterioridad. Además, se pueden apreciar unos picos en la distribución de tensiones en el nodo 1, lo que podría significar un colapso de la estructura.

- Desplazamientos de la estructura completa debido al impacto.

Para finalizar con el estudio de las simulaciones, en las siguientes Figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22, se muestran los desplazamientos que sufre el sistema de protección debido al impacto en cada una de las simulaciones. Este desplazamiento indica la distancia que necesitaría la estructura para frenar el proyectil.

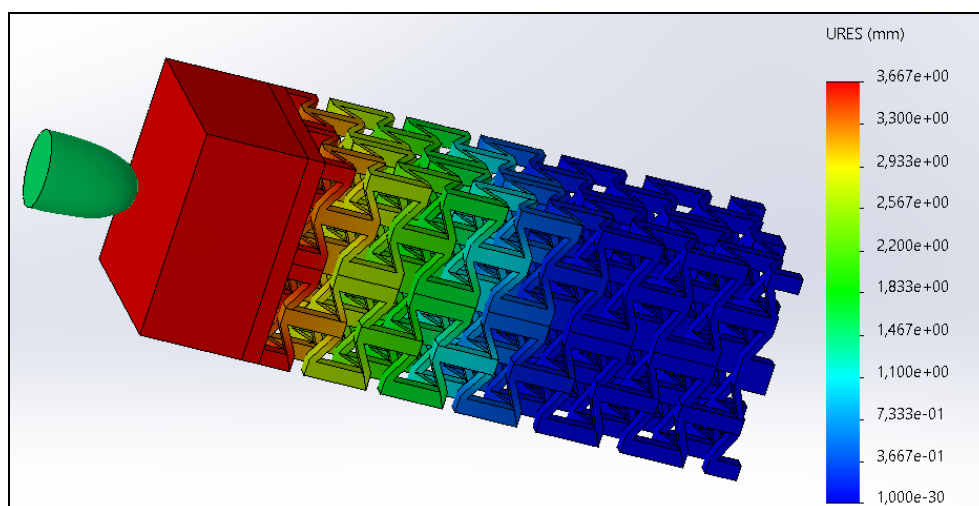


Figura 3.22.: Desplazamientos en Simulación 1.

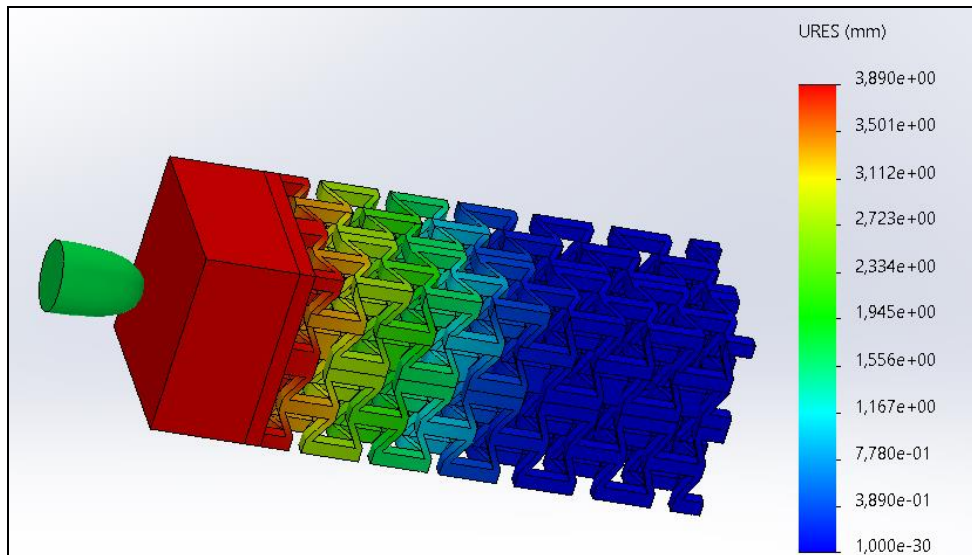


Figura 3.23.: Desplazamientos en Simulación 2.

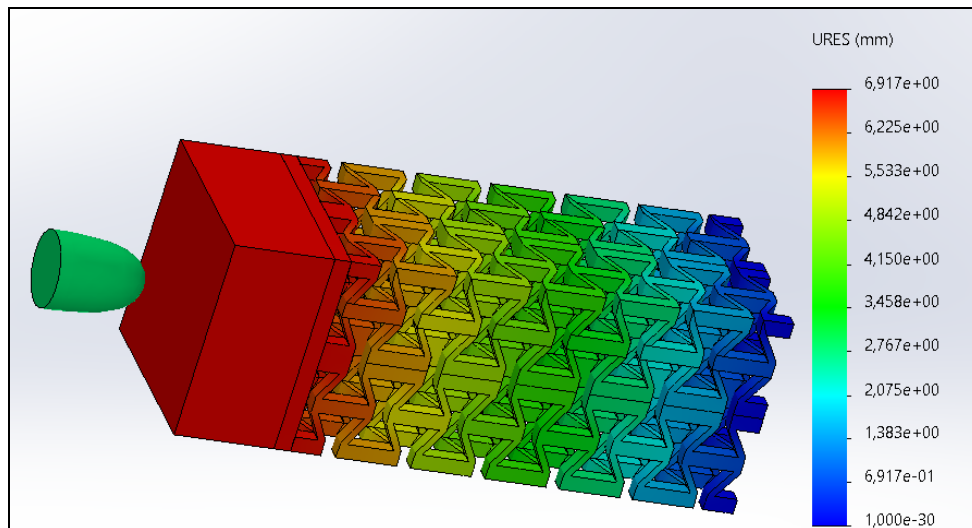


Figura 3.24.: Desplazamientos en Simulación 3.

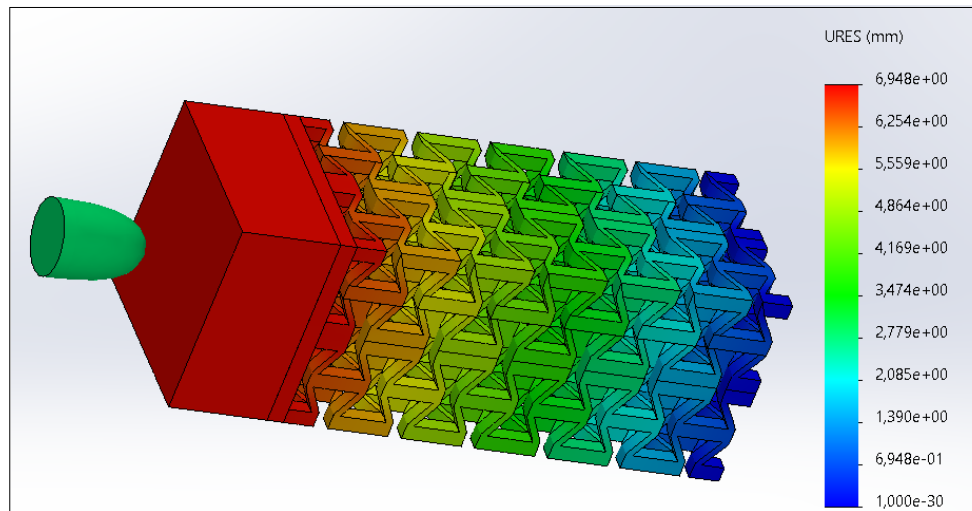


Figura 3.25.: Desplazamientos en Simulación 4.

Como resultados de desplazamientos máximos se manifestarían los siguientes por simulación:

SIMULACIÓN	DESPLAZAMIENTO MAX. (mm)
1	3.667
2	3.89
3	6.917
4	6.948

Tabla 3.6.: Desplazamientos máximos de simulaciones.

4. Conclusiones y futura investigación

4.1. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio de diseño de un prototipo de un sistema de protección balístico. Tras realizar una investigación y análisis previo de los factores que influyen en el desarrollo de este trabajo, mediante el software de modelado 3D se ha diseñado y simulado el comportamiento de una estructura compuesta para probar su validez ante distintos tipos de impacto. El prototipo se ha construido teniendo en cuenta cuatro premisas; soportar el impacto de un proyectil 9 mm sin causar ningún daño en el objetivo del mismo, implementar la tecnología auxética en la estructura de protección, aplicar la fabricación aditiva para el proceso de construcción de la estructura compuesta e intentar lograr un peso lo menor posible.

Para el diseño del sistema de protección balístico, se ha planteado una estructura compuesta por capas. En primer lugar, estaría una capa de alúmina de 12 mm encargada de impedir el avance del proyectil hacia el objetivo. A continuación, estaría situada una capa dúctil de 2 mm de aluminio, encargada de evitar el avance de cualquier tipo de fragmento que podría convertirse así mismo en proyectil, ya sean provenientes del proyectil original o cerámicos provenientes de la primera capa de alúmina. Por último, encargada de absorber la energía del impacto del proyectil y evitar que dañe al blanco, estaría la capa de estructura auxética reentrante de 50 mm de espesor. Juntando cada una de las capas en una estructura compuesta, esta presentaría una densidad total de 2.6138 g/cm^3 .

Tras realizar el diseño y modelado de la estructura, se ha llevado a cabo una modelización de la estructura auxética, definiendo las propiedades más características y comportamiento. Seguidamente, con el fin de validar y analizar el comportamiento de la estructura más aproximado a un caso real, se han realizado una serie de simulaciones

con Solidworks sobre el prototipo. Primeramente, se han simulado una serie de fuerzas de compresión sobre la estructura auxética, desde 100 N hasta 500 N, con el fin de analizar el comportamiento y resistencia de la estructura. Y en segundo lugar, con el fin de simular una situación más similar a la realidad, se han simulado una serie de impactos sobre la estructura completa con cuatro tipos diferentes de proyectil. Cada una de estos proyectiles correspondientes a los niveles II, IIIA, III y IV según el NIJ Standard – 0108.01. Como resultados de estas simulaciones, se han obtenido unos desplazamientos de la estructura compuesta de 3.667 mm, 3.89 mm, 6.917 mm y 6.948 mm respectivamente para cada simulación. Sin embargo, analizando los resultados de la evolución de las tensiones de von Mises durante el impacto, se ha llegado a la conclusión que el sistema de protección será eficaz únicamente en el caso de impacto de proyectiles de hasta nivel IIA, ya que en las simulaciones 3 y 4, si bien el proyectil es detenido, la distribución de tensiones llega a alcanzar al objetivo, aunque de forma amortiguada, pudiendo llegar a provocar daños en el mismo. Además, tomando como base los picos máximos de tensiones y los gráficos de comportamiento de la estructura ante los impactos, en estos dos últimos casos, la estructura podría no soportar el impacto de los proyectiles. Dado la importancia que podría llegar a tener un fallo en la actuación de este sistema de protección debido a su aplicación, no se podría llegar a considerarse válida la estructura para proyectiles de nivel III y IV. Por otro lado, con el fin de perfeccionar el prototipo en el caso de las dos primeras simulaciones, se podría reducir el grosor de la capa de estructura auxética un máximo de 20 mm, ya que como puede apreciarse en las Figuras 3.17 y 3.18, la distribución de tensiones no llega a alcanzar la distancia de 30 mm a través de la estructura auxética. Con esto se lograría un menor peso en la estructura compuesta.

4.2. FUTURA INVESTIGACIÓN

El campo de los materiales auxéticos es un campo aún con un gran abanico de posibilidades que investigar. Sin embargo, en los últimos años ha adquirido mayor importancia debido a las ventajas en propiedades mecánicas que presentan respecto a los materiales convencionales, por tanto, no sería en vano continuar con la investigación en este ámbito.

Con el fin de continuar el estudio de este tipo de materiales, partiendo del trabajo realizado en este proyecto, se presentan a continuación una serie de ideas. Primeramente, con el objetivo de solventar el resultado más decepcionante de este proyecto, que sería la eficacia de la estructura frente a proyectiles de nivel III y IV, se plantea la idea de sustituir el material de fabricación de la estructura auxética por uno que presente mejores propiedades mecánicas; por ejemplo, la aleación AA5083-H116, Acero inoxidable 304 recocido o Acero AISI 4340, si bien supondría un mayor peso para la estructura. Otra opción sería variar el espesor de las distintas capas o de la estructura reentrante de la capa auxética para una mayor absorción del impacto.

Por otro lado, también podría continuarse con la investigación enfocando el diseño del prototipo en una aplicación más concreta, ya sea blindaje de automóviles, chalecos antibalas, protecciones civiles, etc.

5. Anexos

5.1. Anexo A

Información de propiedades de materiales Onyx fabricados por Markforged.

MATERIAL DATASHEET



Composites

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon	
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7	Markforged parts are primarily composed of Composite Base materials. Users may reinforce parts with one type of Continuous Fiber.
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51	Dimensions and construction of test specimens:
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36	
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150	<ul style="list-style-type: none"> Tensile: ASTM D638 type IV beams Flexural: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H) Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71	71	83	50	1. Measured by a method similar to ASTM D790. Composite Base -only parts do not break before end of flexural test.
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0	3.6	3.7	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	138	41	2. Onyx FR is UL 94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm.
Flame Resistance	UL94	—	V-0 ²	—	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	44	110	3. Surface resistance measured on multiple part surfaces using recommended print settings by an accredited third party test facility. See Onyx ESD technical data sheet for more details.
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—	—	10 ⁵ - 10 ⁷	—	
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2	1.1	

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Carbon FR	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	760	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	57	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	1.6	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	50	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	1.6	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	420	300	130	180	216
Compressive Modulus (MPa)	D6641	62	59	25	24	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	0.5	1.5	—	0.8
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	810	2000	2600	3100
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

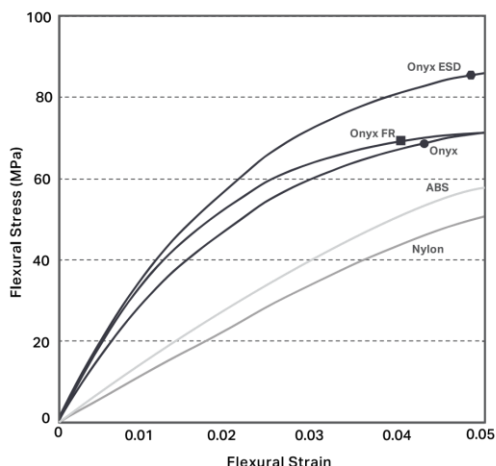


Composites

Markforged composite printers are capable of Continuous Fiber Reinforcement (CFR) — a unique process that reinforces FFF parts with high-strength continuous fibers. A CFR capable machine uses two extrusion systems: one that extrudes Composite Base material in a standard FFF process, and a second for long strand continuous fibers that are laid down in-layer, replacing FFF infill.

Composite Base

Markforged Composite Base materials print like conventional FFF thermoplastics. They can be printed by themselves, or reinforced with any of our continuous fibers, including Carbon Fiber, Kevlar, and Fiberglass.



● **Onyx** Flexural Strength: 71 MPa

Onyx is a micro carbon fiber filled nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

■ **Onyx FR** Flexural Strength: 71 MPa

Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

● **Onyx ESD** Flexural Strength: 83 MPa

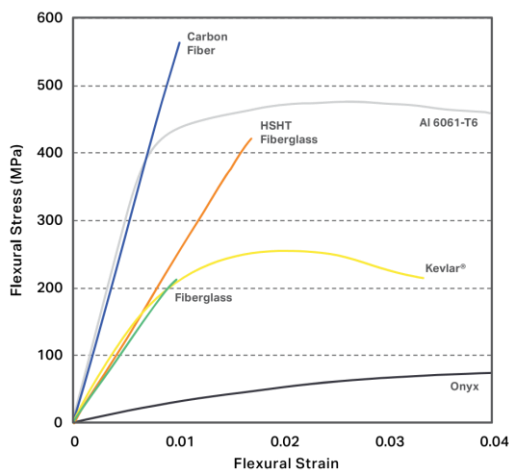
Onyx ESD is a static dissipative safe variant of Onyx — meeting stringent ESD safety requirements while offering excellent strength, stiffness, and surface finish. It's best used in applications that require ESD safe materials.

● **Nylon** Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

Continuous Fiber

Continuous Fibers are laid down on the inside of parts through a second fiber nozzle. They cannot be printed by themselves — instead, they are used to reinforce parts printed out of a composite base material like Onyx.



● **Carbon Fiber** Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

● **Fiberglass** Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

● **Kevlar®** Flexural Strength: 240 MPa

Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

● **HSHT Fiberglass** Flexural Strength: 420 MPa

High Strength High Temperature (HSHT) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.

5.2. Anexo B

Planos del diseño de prototipo de protección auxética.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

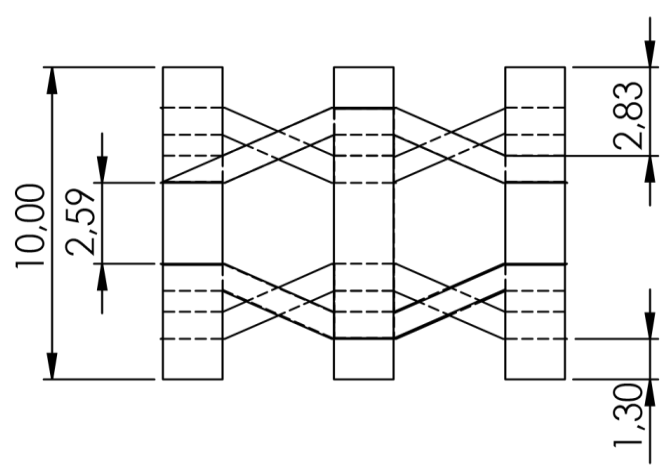
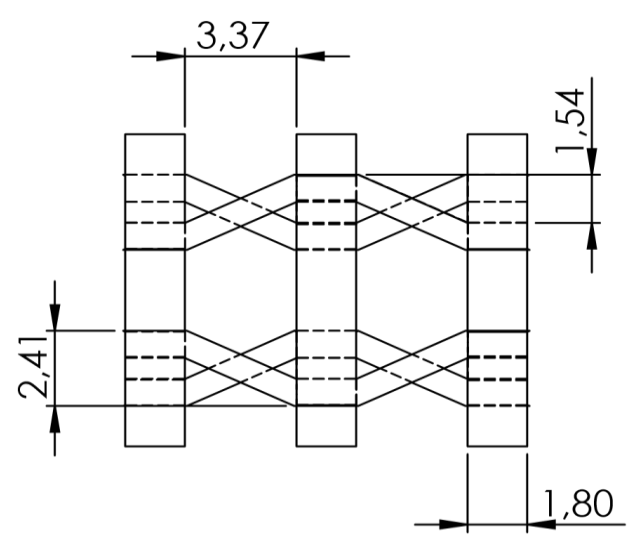
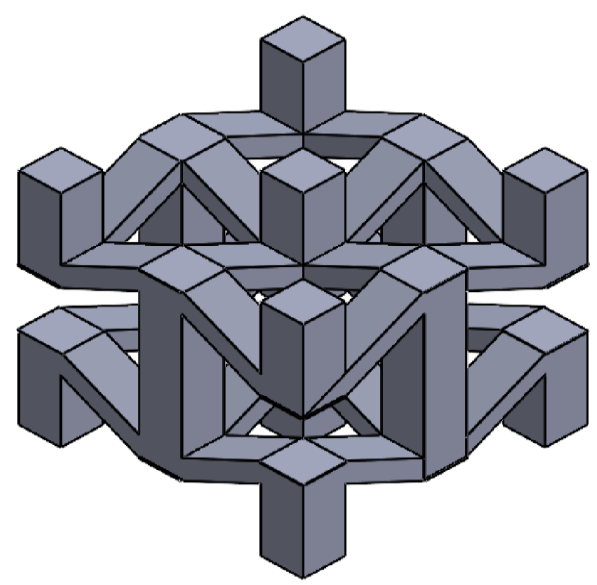
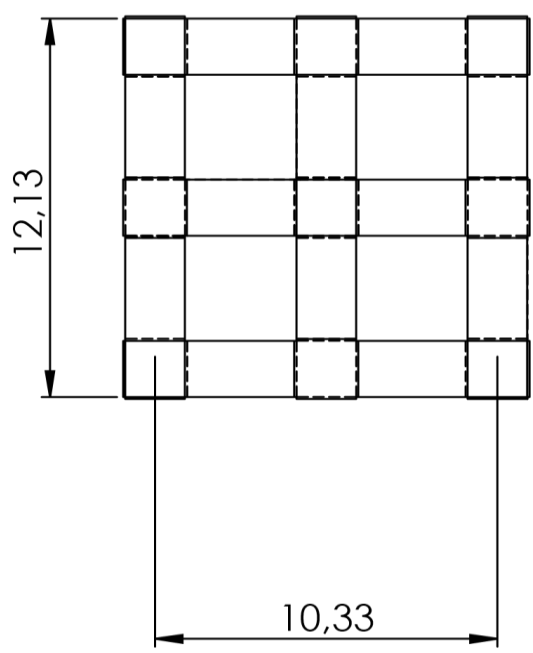
C

B

B

A

A



TÍTULO:
Trabajo Fin de Grado
Ing. Mecánica

N.º DE DIBUJO
Celda Auxética

A4

MATERIAL: Onyx ESD

ESCALA: 2:0.5

HOJA 1 DE 2

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

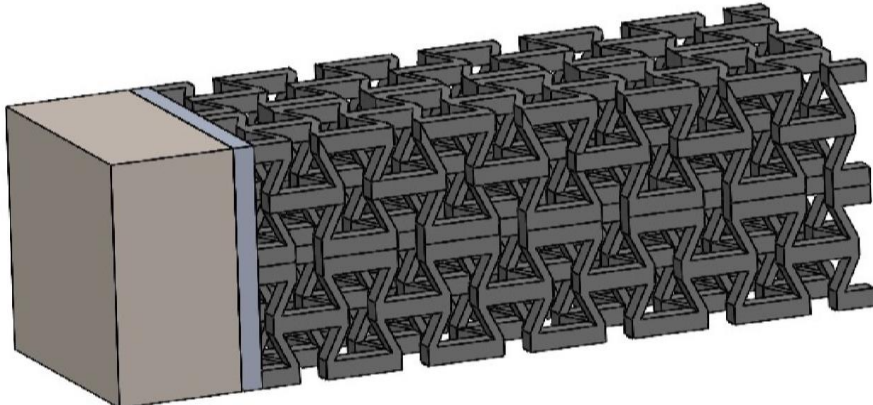
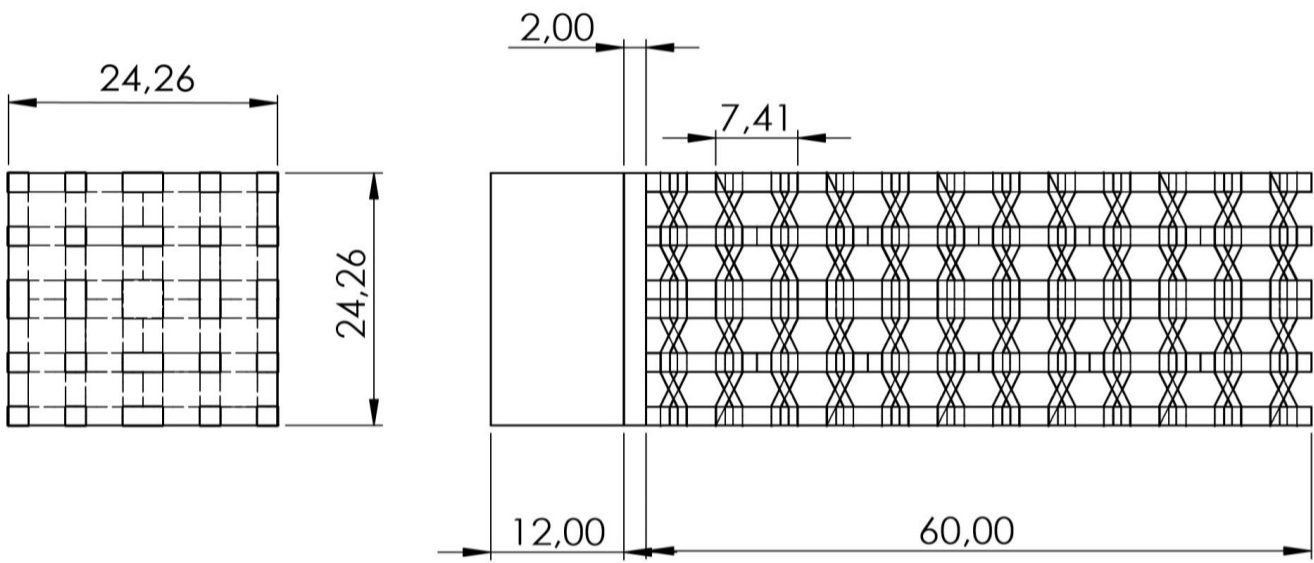
C

B

B

A

A



TÍTULO: **Trabajo Fin de Grado Ing. Auxética**

N.º DE DIBUJO: **Prototipo estructura compuesta de protección auxética**

ESCALA: 1:0.75

HOJA 2 DE 2

A4
mm

MATERIAL:
Alúmina, Aluminio, Onyx ESD

4

3

2

1

6. Referencias

- [1] Carlos Sáez Comet, *Auxetics*, 2016, ELISAVA – Barcelona School of Design and Engineering, < <http://materiability.com/auxetics/>>.
- [2] Lakes, R. and Wojciechowski, K.W., 2008. Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability. *Physica Status Solidi B*, 245(3), pp.545-551.
- [3] David Romero Diez, Design and modeling of a wing for UAV, Trabajo Fin de Grado, ULE, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, 2021.
- [4] T.C. Lim. *Auxetic materials and structures*. 1st Ed. Springer: School of Science and Technology, 2015.
- [5] Awrejcewicz, Jan. (2012). *Theory of Impact*. 10.1007/978-1-4614-3740-6_5.
- [6] Pizhong Qiao, Mijia Yang, Florin Bobaru, Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials: Review, *Journal of Aerospace Engineering* 21:4 (October 1, 2008), pp. 235–248.
- [7] Goldsmith, W., and Sackman, J. L. (1992). “An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates.” *Int. J. Impact Eng.*
- [8] Johnson, K. L. (1985). *Contact mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [9] Walley, S.M. & Field, J.E. (2016). *Elastic Wave Propagation in Materials*. 10.1016/B978-0-12-803581-8.02945-3.
- [10] J.S. Rinehart y J. Pearson, “Behaviour of Metals under Impulsive Loads”, *Acta Cryst*, vol.8.

- [11] R.C. Laible, "Ballistic Materials and Penetration Mechanics", Elsevier Science Ltd, 1980.
- [12] R.M. Walser, "Electromagnetic metamaterials", *Proc. SPIE*, vol. 4467, 2001.
- [13] Evans, Ken (1991), "Auxetic polymers: a new range of materials.", *Endeavour*.
- [14] Mazaev, Alexey & Ajeneza, Oleg & Shitikova, Marina. (2020). Auxetics materials: classification, mechanical properties and applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 747. 012008. 10.1088/1757-899X/747/1/012008.
- [15] Lakes, Roderic & Witt, R. (2002). Making and Characterizing Negative Poisson's Ratio Materials. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 30. 10.7227/IJMEE.30.1.5.
- [16] Liu, Yanping & Hu, Hong. (2010). A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific research and essays*. 5. 1052-1063.
- [17] V. H. Carneiro, J. Meireles, H. Puga, "Auxetic materials – a review", *Materials Science – Poland*, vol.31, 2013.
- [18] Choi J B and Lakes R S, 1996, "Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis", *Int. J. Fract.*
- [19] V. Sánchez Gálvez, *Materiales para la Defensa*, Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de las Telecomunicaciones, UPM, ISBN:978-84-7402-391-6, 2012.
- [20] M. V. Silva, D. Stainer, H. A. Al-Qureshi, O. R. K. Montedo, and D. Hotza, *Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing*, Shaomin Liu, 2014.

[21] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, pp. 293–297.

[22] Shokri Rad, M., Hatami, H., Alipouri, R., Farokhi Nejad, A., and Omidinasab, F., "Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures", *Mechanics and Industry*, vol. 20, no. 3, 2019. doi:10.1051/meca/2019019.

[23] Yang, L., Harrysson, O., West, H. et al. Modeling of uniaxial compression in a 3D periodic re-entrant lattice structure. *J Mater Sci* 48, 1413–1422 (2013).