



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio prospectivo de materiales balísticos existentes en el mercado para la construcción de una casa de tiro que permita el realizar ejercicios de tiro con calibres de 5,56 mm y 9 mm.

Autor

**Fernando Valero Otonín**

Director/es

Director académico: Dra. Doña Vera Cuartero Yagüe  
Director militar: Cap. Don José Antonio Lambán Villanueva

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar  
Año 2019



A mis padres

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a una serie de personas las cuales han hecho todo lo posible en su mano para ayudarme en lo que he necesitado.

En primer lugar quiero agradecer al Capitán de Ingenieros Don José Antonio Lambán Villanueva su plena disposición para resolverme diferentes problemas que han surgido a lo largo del desarrollo del proyecto, ejerciendo de director militar durante el trabajo. Pero sobre todo, por haberse preocupado de planificar las 7 semanas de prácticas en el Batallón de Zapadores I, haciendo posible mi integración total en la Unidad.

Por otro lado, a mi directora académica, la Dra. Doña Vera Cuartero Yagüe, quien ha dedicado su tiempo a ayudarme y corregirme el trabajo con el objetivo de obtener el mejor resultado posible. El trabajo no habría salido adelante sin su ayuda.

Y sin duda, a quien más debo agradecer este trabajo es a mis padres, quienes me han proporcionado una educación magnífica y me han ayudado en todo aquello que he necesitado y más. Por transmitirme los valores del esfuerzo y la humildad, completamente necesarios para alcanzar mis objetivos. Por haber hecho todo lo posible por hacerme feliz.

Gracias.

## **RESUMEN**

El combate actual ha dejado de desarrollarse en espacios abiertos en los que miles de soldados se enfrentan con ejércitos similares. Hoy en día nuestras tropas desarrollan sus misiones en escenarios englobados dentro de la guerra asimétrica, en la cual uno de los bandos es inferior al otro. Por ello, esta clase de grupos minoritarios llevan el combate a zonas urbanizadas, donde los espacios son reducidos y pueden hacer uso de la población civil.

El Ejército de Tierra precisa de instalaciones para instruir a sus tropas en este combate urbanizado. Las denominadas 'casas de tiro' permiten prepararse para estas situaciones. En el trabajo desarrollado se estudian los diferentes materiales adquiribles en el mercado para conformar esta clase de infraestructuras, con el fin de ayudar en la homologación de la primera casa de tiro en nuestro país.

## **ABSTRACT**

The current combat has ceased to take place in open spaces in which thousands of soldiers face each other with similar armies. Today, our troops carry out their missions in asymmetric warfare scenarios, in which one side is inferior to the other. For this reason, this class of minority groups carry out combat in urbanized areas, where spaces are reduced and they can make use of the civilian population.

The Army needs facilities for instructing their troops in this urbanized combat. The so-called 'killing houses' allow you to prepare for these situations. In the work developed, the different materials available on the market are studied in order to create this kind of infrastructure, in order to help in the homologation of the first killing house in our country.

## Índice

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                 | 8  |
| 1.1 Antecedentes .....                                                               | 9  |
| 1.2 Objetivos .....                                                                  | 10 |
| 1.3 Casa de tiro.....                                                                | 11 |
| 1.4 Definición calibre.....                                                          | 12 |
| 2. METODOLOGÍA.....                                                                  | 13 |
| 3. ESTADO DEL ARTE .....                                                             | 14 |
| 3.1 Normativa vigente .....                                                          | 14 |
| 3.1.1 Sector armamentístico.....                                                     | 14 |
| 3.1.2 Sector de la construcción.....                                                 | 14 |
| 3.2 Relación de los materiales empleados en las instalaciones de tiro en España..... | 15 |
| 4. MATERIALES.....                                                                   | 16 |
| 4.1 Materiales propuestos para conformar suelos .....                                | 16 |
| 4.1.1 Suelo de caucho sellado.....                                                   | 18 |
| 4.1.2 Suelo de caucho vulcanizado .....                                              | 19 |
| 4.1.3 Suelo de caucho natural .....                                                  | 19 |
| 4.2 Evaluación de materiales para conformar suelos.....                              | 20 |
| 4.3 Materiales propuestos para conformar paredes.....                                | 21 |
| 4.3.1 Loseta de caucho antirebote.....                                               | 22 |
| 4.3.2 Cortina antifragmentos.....                                                    | 23 |
| 4.3.3 Láminas de caucho.....                                                         | 24 |
| 4.4 Evaluación de materiales para conformar paredes .....                            | 24 |
| 4.4 Materiales propuestos para conformar techos .....                                | 26 |
| 5. SIMULACIÓN IMPACTO BALÍSTICO EN MATERIALES.....                                   | 26 |
| 5.1 Loseta de caucho antirebote.....                                                 | 28 |
| 5.2 Hule látex .....                                                                 | 31 |
| 5.3 Techo Herakustik .....                                                           | 32 |
| 6. CONCLUSIONES.....                                                                 | 34 |
| 7.BIBLIOGRAFÍA .....                                                                 | 37 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1: Configuración general galería de tiro .....             | 9  |
| Ilustración 2: Configuración casa de tiro.....                         | 12 |
| Ilustración 3: HK G36 E .....                                          | 13 |
| Ilustración 4: Estaciones calle de tiro CENAD San Gregorio .....       | 15 |
| Ilustración 5: Gráfica tensión-deformación .....                       | 17 |
| Ilustración 6: Radar chart suelos .....                                | 21 |
| Ilustración 7: Orificios cerrados tras la entrada de proyectiles ..... | 23 |
| Ilustración 8: Radar chart paredes .....                               | 25 |
| Ilustración 9: Configuración paredes habitación casa de tiro .....     | 26 |
| Ilustración 10: Caucho antirebote.....                                 | 29 |
| Ilustración 11: Tensión principal $\sigma$ .....                       | 30 |
| Ilustración 12: Hule látex .....                                       | 31 |
| Ilustración 13: Dirección radial .....                                 | 33 |
| Ilustración 14: Techo Herakustik .....                                 | 33 |
| Ilustración 15: Orificios tras el impacto de distintos calibres.....   | 43 |
| Ilustración 16: Durómetro para dureza Shore.....                       | 53 |
| Ilustración 17: Entrecruzamiento caucho y azufre.....                  | 55 |
| Ilustración 18: Comparativa caucho natural y vulcanizado.....          | 55 |
| Ilustración 19: Carga aplicada sobre la placa.....                     | 62 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Tabla 1: Materiales suelos.....   | 18 |
| Tabla 2: Materiales paredes ..... | 22 |
| Tabla 3: Media aritmética .....   | 66 |
| Tabla 4: Espesores .....          | 67 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El origen de las denominadas casas de tiro se entiende a partir del profundo cambio sufrido en las tácticas, técnicas y procedimientos empleados en el combate. Se ha evolucionado de la guerra convencional caracterizada por el enfrentamiento entre dos bloques con capacidades y estrategias similares, a la guerra asimétrica, en la cual existe una gran diferencia cuantitativa y cualitativa entre ambos bandos. Mientras que uno de ellos presenta unas tropas jerarquizadas, recursos casi ilimitados y medios tecnológicamente muy avanzados, el otro se ve muy limitado en cuanto a personal y capacidades. Es por ello por lo que el bando técnicamente inferior trata de llevar el conflicto a espacios reducidos donde la fuerza superior no pueda aprovechar su ventaja numérica. De este modo, este tipo de conflicto se desarrolla en un entorno urbano, donde la fuerza inferior vea aumentadas sus posibilidades de éxito. Es también de destacar el uso de la población por este bando con diferentes finalidades como el espionaje o como escudo humano, aumentando así la dificultad de las misiones ejecutadas por nuestras Fuerzas Armadas en el exterior.

No existen demasiadas instalaciones que permitan instruirse en este tipo de combate en nuestro país. Esto se debe a la inexistencia de proyectos aprobados y homologados por el Ministerio de Defensa, dada la complejidad que conlleva la elaboración de estos proyectos en cuanto a temas de seguridad, costes, etcétera. Para la realización de este trabajo, se ha realizado una investigación de diferentes polígonos y galerías de tiro en España, obteniendo así conclusiones acerca de los materiales existentes para construir una casa de tiro.

Por lo que respecta a las galerías de tiro, se pueden encontrar varias en España con configuraciones diferentes, pero generalmente suelen presentar la estructura ofrecida en la Ilustración 1:

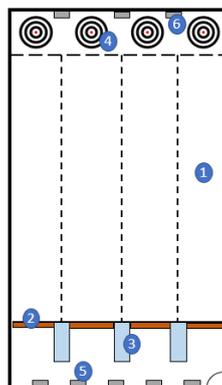


Ilustración 1: Configuración general galería de tiro. Fuente: elaboración propia.

Para comenzar, el marcador 1 muestra una serie de calles utilizables por los usuarios para hacer uso de su arma propia o alquilada. La longitud de esta calle puede variar desde 10 hasta 50 m en función del alcance y precisión del arma que se vaya a utilizar. En segundo lugar, el marcador número 2 hace referencia a los puestos de tirador, compuestos por una mesa con un soporte en el que apoyar el arma. Este soporte permite aumentar la estabilidad del arma incrementando así la precisión del tirador. Estos puestos están separados normalmente por una mampara de cristal blindado, señalizada a través del marcador número 3. Estas mamparas, aparte de delimitar los puestos y absorber parte de la onda sonora tras el disparo, impiden que las vainas expulsadas por las armas a alta temperatura tras los disparos colisionen contra otros usuarios pudiendo producir accidentes. En cuarto lugar están localizados los blancos a los que hacer puntería. Estos pueden estar compuestos de diferentes materiales como el corcho. Por último, los marcadores 5 y 6 hacen referencia al sistema de ventilación. En concreto, el número 5 hace referencia a los ventiladores que introducen aire en la galería y el número 6 a los extractores que lo retiran. A través de ellos se limpia la galería de las partículas de plomo nocivas para la salud causadas por los proyectiles mediante una serie de renovaciones del aire periódicas<sup>1</sup>.

## 1.2 Objetivos

El documento que a continuación se redacta tiene como finalidad realizar una comparación de los diferentes materiales disponibles en el mercado capaces de garantizar la seguridad de los usuarios que trabajen con los calibres 5,56 y 9 mm dentro de una casa de tiro, reduciendo al máximo los riesgos que conlleva el empleo de munición real en esta clase de instalaciones.

Para ello se analizará el estado actual de las galerías y calles de tiro en España, profundizando tanto en los materiales empleados para evitar rebotes como en las medidas de seguridad adoptadas para proteger tanto la instalación como a los usuarios. Se presentarán por tanto los diferentes materiales, así como sus características y propiedades mecánicas.

Se llevará a cabo una simulación consistente en evaluar el efecto del impacto de proyectiles balísticos en los diferentes materiales, obteniendo conclusiones que ayuden a mejorar la seguridad en las casas de tiro futuras.

Con la ejecución de este trabajo se pretende ayudar al Batallón de Zapadores nº1 en ser la primera Unidad en España en construir una casa de tiro, la cual permita a sus

---

<sup>1</sup> Se llevan a cabo 32 renovaciones/hora para garantizar la limpieza del aire.

componentes adiestrarse en el denominado combate urbanizado, el cual será llevado a la práctica en las diferentes zonas de operaciones en las que están desplegadas las tropas españolas.

### 1.3 Casa de tiro

El término casa de tiro hace referencia a una instalación militar o policial preparada para entrenar el denominado ‘combate en población’ con munición real. Esta modalidad de combate se desarrolla en ambientes urbanos donde los espacios son reducidos (viviendas, calles, etcétera) y el riesgo elevado. Por ello la velocidad de reacción debe ser máxima, siendo el personal capaz de discriminar entre personal civil y enemigo.

La casa de tiro es el escenario idóneo para simular esta clase de situaciones. Se trata de una serie de habitaciones conectadas a través de pasillos en las que se colocan diferentes tipos de objetivos. De este modo, sin conocer el diseño de la estructura, un grupo variable de personas reconoce las habitaciones y elimina a los enemigos. Puede también practicarse el rescate de rehenes aumentando así la dificultad de la operación. En algunas de estas casas, es posible incluso modificar la estructura interior de la instalación, a través de una serie de carriles que permiten mover los paneles que separan las distintas habitaciones.

Sin embargo, la característica más destacada de una casa de tiro es su disponibilidad para practicar ejercicios con munición real. Gracias a una serie de materiales antirebote que garanticen la seguridad de los usuarios y a un complejo sistema de ventilación que evite problemas de salud respiratorios, puede hacerse uso de diferentes tipos de municiones empleadas por unidades militares y policiales. De esta forma se consigue alcanzar un grado de simulación muy próximo a la realidad, instruyendo al personal de la mejor forma posible.

En cuanto a su estructura, es posible tanto diferenciar los elementos que permiten instruirse a los usuarios, como visionar los posibles errores para corregirlos en un futuro. Se presenta en la Ilustración 2 una vista en planta de la estructura interior de una casa de tiro en la que se han señalado con números cardinales las partes en que se compone:



*Ilustración 2: Configuración casa de tiro [1].*

En primer lugar, está localizada la entrada al edificio en la esquina inferior izquierda de la ilustración. Se trata de un punto crítico en el que pueden producirse bajas, dado que generalmente no se posee información acerca de la estructura interior del edificio. En segundo lugar se encuentra el pasillo principal del edificio. De este salen la mayoría de las habitaciones de la instalación que habrá que registrar. Debe existir siempre un estricto control sobre este pasillo, puesto que su dominio posibilita el registro de los diferentes habitáculos. Del pasillo principal se accede a las habitaciones (número 3), en las que con mayor probabilidad se encontrará al enemigo. En cuarto lugar se encuentra una pasarela elevada desde la que corregir los fallos producidos durante la instrucción. Es de gran utilidad, ya que permite observar con claridad los procedimientos empleados por los usuarios y proponer mejoras para aumentar la eficacia y disminuir el riesgo. Para simular una situación absolutamente real se instalan una serie de blancos (número 5) a los que hacer puntería durante la práctica. Pueden identificarse con enemigos o personal civil al que no debe dispararse, aumentando así el nivel de exigencia para los tiradores. Y por último, las paredes que componen la casa de tiro (número 6). Estas deben estar fabricadas de un material antirebote capaz de evitar accidentes y de proteger los paramentos verticales y horizontales de la instalación. En el mercado existen distintos materiales capaces de cumplir estas funciones. La evaluación de estos materiales será llevada a cabo en el proyecto con mayor detalle.

#### 1.4 Definición calibre

En cuanto a la definición de calibre en el ámbito militar [2], hace referencia tanto al diámetro interior de las armas de fuego como al diámetro de los proyectiles. En este trabajo se estudiará el efecto de los proyectiles con calibres 5,56 y 9 mm. El calibre 5,56 mm es empleado en el fusil Heckler & Koch G36 modelo E [3], [4] (ver Ilustración 3), siendo este el reglamentario en las Fuerzas Armadas españolas. Por otro lado, el calibre 9 mm es utilizado en la pistola HK USP [5], reglamentaria en el Ejército de Tierra. Este armamento, tanto el fusil como la pistola, es con el que despliegan las Unidades del Ejército de Tierra en zona de operaciones para desarrollar sus misiones. Cada soldado

tiene asignado un fusil con un número de serie correspondiente, mientras que las pistolas son portadas por los oficiales, estando también asignadas personalmente.



*Ilustración 3: HK G36 E [3].*

## 2. METODOLOGÍA

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en el trabajo se han desarrollado las siguientes fases:

- En primer lugar, se han realizado visitas a diferentes instalaciones de tiro en España (galería de tiro ‘Shooting Range’ y calle de tiro instintivo en el CENAD San Gregorio, ambas en el término municipal de Zaragoza) elaborando cuestionarios al personal trabajador, detallados en el Anexo A, así como investigaciones relativas al estado de este tipo de infraestructuras en nuestro país.
- A partir de las conclusiones extraídas se obtiene una visión general de los materiales disponibles en el mercado para construir una casa de tiro.
- Tras realizar el correspondiente acopio de información en torno a los materiales (características, propiedades mecánicas, etcétera) se procede a realizar una comparación de los mismos con objeto de identificar aquellos con mejores prestaciones.
- Se utiliza la herramienta ‘radar chart’ con el fin de visualizar gráficamente cuáles son los materiales óptimos para crear la instalación.
- Se lleva a cabo una simulación con el objetivo de estudiar la resistencia de los materiales ante el impacto de un proyectil. En concreto se estudian aquellos que mejores cualidades ofrecen para construir una casa de tiro, de acuerdo con la evaluación de la herramienta ‘radar chart’.
- Finalmente, se extraen conclusiones a partir de los resultados de la simulación y de la comparación realizada anteriormente.

Para emprender el desarrollo del proyecto ha sido necesario analizar la situación en que se ven involucradas las tropas españolas en misiones en el extranjero. Se trata de escenarios en los que el combate se desarrolla en entornos urbanos, lo que hace

imprescindible la instrucción en casas de tiro como la presentada en el Anexo B del proyecto.

También se ha estudiado la documentación militar referida a las casas de tiro. En concreto la Instrucción técnica 01/06, referente a la regulación de instalaciones para la instrucción con fuego real en el interior de edificios [6].

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 Normativa vigente

El presente documento estará sujeto tanto a la legislación correspondiente al sector armamentístico como a toda la normativa vigente del sector de la construcción, particularmente en lo que concierne a la resistencia de materiales.

##### 3.1.1 Sector armamentístico

Real Decreto 137/1993, de 29 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Armas.

Real Decreto 989/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de artículos pirotécnicos y cartuchería.

Orden INT/3012/2002, de 14 de noviembre, por la que se aprueba el modelo de guía de pertenencia de las armas del personal de la Guardia Civil, policías locales, policías autonómicas y de Vigilancia Aduanera.

##### 3.1.2 Sector de la construcción

Instrucción General 480/1 de 1980, referente a Normas para las Unidades de Ingenieros en Obras de interés militar sin participación de Comandancia de Obras.

NOP nº0501/05 de fecha 31-03-05, referente a Normas para la elaboración de Proyectos de obras en el ámbito de Unidades del Mando de Ingenieros.

Instrucción Técnica 01/06. Regulación de instalaciones. Instalaciones para la instrucción con fuego real en interior de edificios (casa de tiro).

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural "EHE.

Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego.

ISO 10545-7: Determinación de la abrasión superficial de las baldosas esmaltadas.

### 3.2 Relación de los materiales empleados en las instalaciones de tiro en España

A lo largo del territorio nacional es posible encontrar distintos polígonos en los que entrenar el combate en población.

Un ejemplo de ello son las estaciones que constituyen la calle de tiro construida por el Regimiento de Pontoneros y Especialidades de Ingenieros nº12 en el campo de maniobras CENAD San Gregorio (Zona Restringida), en el término municipal de Zaragoza (ver Ilustración 4). Inicialmente, con el objetivo de evitar rebotes, toda la superficie destinada a la construcción de la calle de tiro se recubrió de zahorra artificial<sup>2</sup>. En cuanto a las fachadas de las estaciones, fueron construidas con muros de hormigón armado prefabricado de 12 cm de espesor y 2,50 m de altura, revestidos con una capa de caucho ondulado antirebote. Este tipo de revestimiento no fue capaz de evitar que los muros se vieran afectados por el fuerte impacto de los proyectiles, afectando así a la durabilidad y seguridad de las estaciones. Por este motivo fue necesario reforzar el revestimiento con acero balístico MARS de 6,5 mm. Este acero encareció el coste de la instalación, de manera que solo se pudo instalar en una de las cuatro estaciones que conforman la calle de tiro.



*Ilustración 4: Estaciones calle de tiro CENAD San Gregorio.  
Fuente: elaboración propia*

Otra instalación que hace uso de este caucho es la galería de tiro empleada por la policía local de Orihuela (Alicante) [7]. En este caso se trata de placas onduladas de

---

<sup>2</sup> La zahorra artificial consiste en una mezcla de áridos (grava y piedra) machacados en plantas de tratamiento.

goma de alta calidad cuyas medidas son de 1000 x 500 x 45 mm, aglomeradas con poliuretano. Estas paredes no ha sido necesario reforzarlas con acero balístico, puesto que entre las paredes de caucho y los muros de hormigón se ha creado una cámara de aire. Esta se ha logrado a través de unos paneles de aglomerado unidos mediante 21 grapas especiales a las placas de caucho y unos rastreles fijados a los muros por 15 puntos de anclaje por panel, creándose así un espacio libre entre los paneles y los rastreles. En cuanto al techo de la sala de tiro, se instaló un falso techo colgado de la cubierta, creado a partir de paneles del denominado techo Herakustik [8] (ideal para la protección contra el fuego y aislar del ruido). Por otro lado, el suelo está conformado a partir de un caucho especial de 40 mm de espesor, con unas medidas de 1000 x 500 x 40 mm con un acabado de poro abierto [9].

## 4. MATERIALES

### 4.1 Materiales propuestos para conformar suelos

El suelo de una casa de tiro debe cumplir una serie de características con el fin de evitar cualquier riesgo contra la seguridad de los usuarios.

Inicialmente, es necesario destacar la importancia de la porosidad [10] (ver Anexo C). En función del grado de porosidad que presente el suelo, la dificultad para limpiar los restos de pólvora depositados en la superficie tras realizar un disparo será mayor o menor. La combustión de esta pólvora puede provocar un incendio. Por este motivo, cuanto menor sea el grado de porosidad, menor será la probabilidad de incendio.

Por otra parte, para conformar los suelos existen diferentes materiales que permiten realizar disparos con calibres 5,56 mm y 9 mm sin que se produzca ningún rebote. En la Tabla 1 se muestran los materiales habitualmente empleados en casas de tiro para la construcción de suelos, de los cuales se detallan las principales propiedades físicas.

Los parámetros analizados corresponden a diferentes características de los materiales que influyen en su resistencia. En primer lugar la dureza Shore [11], método de medición de la dureza presentada por los mismos, siendo esta la resistencia del material frente a la deformación plástica localizada (el proceso de medición queda detallado en el Anexo D).

Por otro lado, se hace referencia a tres magnitudes físicas completamente vinculadas: el módulo elástico, el límite elástico y la resistencia mecánica [12]. Se relacionan a través del diagrama tensión-deformación [13], el cual hace referencia a la

relación entre la tensión (fuerza entre la sección inicial de la probeta a estudiar) y la deformación provocada por dicha tensión (incremento de longitud en cada instante entre la longitud inicial calibrada).

En este diagrama se distinguen varias zonas a estudiar por las que pasan los materiales a medida que se aumenta la tensión ejercida sobre el material. Estas son:

- Zona elástica, en la que existe una relación lineal entre la tensión a la que es sometido el material y su deformación.
- Zona plástica, en la que el diagrama presenta una curva en la que la deformación producida en el material alcanza su máximo.

Por lo que respecta a la zona elástica, es de destacar que las deformaciones sufridas por los materiales desaparecen una vez deja de aplicarse la tensión que las provoca. En esta zona representada a través de una recta es característica la pendiente de la misma. Se denomina módulo elástico o módulo de Young ( $E$ ) (ver Ilustración 5) y es la relación entre la tensión aplicada ( $\sigma$ ) y la deformación producida ( $\varepsilon$ ):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

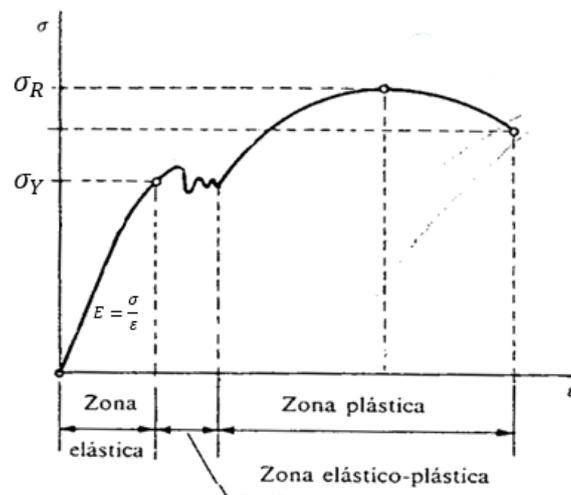


Ilustración 5: Gráfica tensión-deformación. Fuente: elaboración propia.

Esta zona termina en un punto denominado límite elástico ( $\sigma_Y$ ). Este punto es el límite a partir del cual las deformaciones se hacen permanentes tras la aplicación de las tensiones (localizándose en la gráfica tensión-deformación en la tensión máxima dentro de la zona elástica) (ver Ilustración 5).

Una vez sobrepasado este límite se encuentra la zona plástica<sup>3</sup>, en la que las deformaciones provocadas por las tensiones tienen carácter permanente, aun habiendo cesado la tensión que las provoca. Es característica de esta zona la denominada resistencia mecánica ( $\sigma_R$ ) [14], siendo esta la máxima tensión que es capaz de soportar el material antes de fracturarse<sup>4</sup> (ver Ilustración 5).

Tras definir las propiedades a estudiar, se procede a compararlos en la Tabla 1 'Materiales suelos':

| TABLA 1<br>(MATERIALES SUELOS) |                             | PROPIEDADES                                   |                                  |                            |                                             |                            |                                 |                                                  |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                |                             | COMPOSICIÓN                                   | DENSIDAD<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | DUREZA<br>SHORE<br>(Sh° A) | MÓDULO<br>ELÁSTICO<br>(Pa)                  | LÍMITE<br>ELÁSTICO<br>(Pa) | RESISTENCIA<br>MECÁNICA<br>(Pa) | ANTIDESLIZANTE                                   |
| MATERIALES                     | SUELO DE CAUCHO SELLADO     | GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO CON POLIURETANO | 1060                             | 80                         | 10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>           | 1,2 x 10 <sup>7</sup>      | 2942 x 10 <sup>4</sup>          | NO (ES NECESARIA CAPA DE PINTURA ANTIDESLIZANTE) |
|                                | SUELO DE CAUCHO VULCANIZADO | CAUCHO VULCANIZADO                            | 930                              | 50                         | 1,7 x 10 <sup>7</sup> - 2 x 10 <sup>7</sup> | 2 x 10 <sup>7</sup>        | 2,5 x 10 <sup>7</sup>           | SÍ                                               |
|                                | SUELO DE CAUCHO NATURAL     | GRANULADO DE CAUCHO NATURAL RECICLADO         | 830                              | 40-80                      | 10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>           | 1,2 x 10 <sup>7</sup>      | 2942 x 10 <sup>4</sup>          | SÍ                                               |

Tabla 1: Materiales suelos. Fuente: elaboración propia.

A continuación se detallan las ventajas e inconvenientes de los tres materiales señalados para la construcción de los suelos.

#### 4.1.1 Suelo de caucho sellado

La primera clase de suelo estudiada es la obtenida a partir del granulado de caucho reciclado con poliuretano. Concretamente, se le aplica una triple capa de poliuretano [15] con el fin de reducir la elevada porosidad del caucho. Es por ello por lo que a este suelo se le denomina "suelo de caucho sellado" [16]. Resaltar la elevada densidad que presenta, con un valor de 1060 kg/m<sup>3</sup>. Este valor hace referencia a la densidad real [17] de la muestra ( $\rho_{sólidos}$ ). Por otra parte, presenta la mayor dureza (80 Sh° A), siendo esta propiedad beneficiosa en cuanto a la resistencia frente a impactos.

En cambio, muestra una importante desventaja al no tratarse de un material antideslizante. Existe la posibilidad de que uno de los tiradores usuarios en la casa de

<sup>3</sup> Tras la zona elástica se encuentra una zona denominada elástico-plástica o zona de fluencia comprendida entre un valor máximo y un mínimo de tensiones muy similares en la que los materiales pueden llegar a sufrir pequeñas deformaciones irreversibles si deja de aplicarse tensión.

<sup>4</sup> Existen ciertos materiales que, una vez sobrepasada su resistencia mecánica, continúan deformándose sin fracturarse. No obstante, estas deformaciones hacen al material inservible. Por ello, en este trabajo se estudia el diagrama tensión-deformación de los materiales hasta su resistencia mecánica.

tiro se resbale y como consecuencia se produzca un disparo fortuito al caer el arma al suelo. Por este motivo, con el fin de aumentar la seguridad de los usuarios se hace necesaria la aplicación de una pintura antideslizante. Esto encarece el coste de la instalación de esta clase de suelo que, junto con la adición del poliuretano, convierte a este material en el menos económico de los presentados en la tabla.

#### 4.1.2 Suelo de caucho vulcanizado

A través del proceso de vulcanizado [18], explicado en el Anexo E, se obtiene un caucho con una capacidad de deformación mayor que la proporcionada por el caucho natural [19]. Se alcanzarán además una mayor resiliencia, resistencia a la tracción, dureza y resistencia a la intemperie, beneficiando así la seguridad en una casa de tiro.

Por lo que corresponde a sus propiedades mecánicas [20], en concreto a la relación entre tensión y deformación (gráfica de tensión-deformación) su módulo elástico (E) tiene un valor de entre  $1,7 \times 10^7$  Pa y  $2 \times 10^7$  Pa. Este valor varía en función de los acelerantes y de la cantidad de azufre aplicados en la reacción de vulcanización. Resaltar también su límite elástico ( $\sigma_Y$ ) de  $2 \times 10^7$  Pa, variando con respecto a los mismos parámetros que el módulo elástico. Para terminar con esta relación, la resistencia mecánica ( $\sigma_R$ ) adopta un valor de  $2,5 \times 10^7$  Pa, también dependiente de la reacción de vulcanización. Este valor elevado en su resistencia mecánica lo hace especialmente útil para la conformación del suelo de una casa de tiro.

En consideración a la seguridad, se trata de un material antideslizante, puesto que presenta una elevada porosidad que dificulta la posibilidad de deslizarse sobre el suelo. No obstante, cuanto mayor es la porosidad mayor es la dificultad de limpiar el suelo de los restos de pólvora. Con el fin de reducir el riesgo de incendios, se hace necesario para la limpieza el uso de un aspirador industrial trifásico [21]. Estos aspiradores evitan el encendido de los restos de pólvora recogidos. Esto es debido a la inexistencia de cargas electrostáticas en su interior y a la localización del motor encargado de proporcionar corriente al conjunto, el cual se encuentra separado de la corriente de aspiración de los restos de pólvora y del depósito en que estos se acumulan, evitando así cualquier tipo de iniciación o deflagración.

#### 4.1.3 Suelo de caucho natural

El caucho natural proviene de una sustancia lechosa denominada 'látex', la cual es extraída de la savia procedente del árbol *Hevea Brasiliensis*, concentrándose la producción global en Asia.

Se trata de un material amorfo que cristaliza al ser sometido a una deformación, lo que le convierte en un material más plástico que elástico, que no recupera su forma original si se le somete a una fuerza que posteriormente desaparece. Esta es la principal desventaja que presenta con respecto al caucho vulcanizado. En cambio, presenta ventajas en comparación con los cauchos sintéticos, como su elevada resistencia mecánica [22] (alrededor de  $3 \times 10^7$  Pa) o su elevada resistencia a impactos y a la fatiga. En cuanto al módulo elástico, varía entre  $10^6$  y  $10^7$  Pa ya que depende de la temperatura, de la composición y del curado del caucho.

Se trata del material con menor densidad ( $830 \text{ kg/m}^3$ ), lo que indica su alto grado de porosidad. Por este motivo se hace necesario también el uso de un aspirador industrial trifásico. Al no haber recibido tratamiento alguno para cerrar los poros, la acumulación de restos de pólvora en el suelo es mucho mayor que la del resto de clases estudiadas. Debe realizarse por tanto un estricto mantenimiento realizando revisiones periódicas cada poco tiempo.

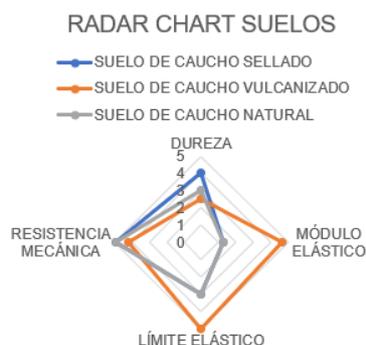
Resaltar el amplio intervalo de durezas que es posible obtener en función de la utilidad que se le quiera dar (entre 40 y 80 Sh° A). En comparación con el caucho vulcanizado se puede observar que presenta una densidad y un módulo elástico menor pero una resistencia mecánica mayor. Esto indica que es menos deformable pero que el esfuerzo necesario para conseguir su rotura a tracción es superior al necesario en el caucho vulcanizado.

La falta de tratamientos sobre este material conlleva una importante reducción en el precio de adquisición. Sin embargo, el exhaustivo mantenimiento y el elevado número de revisiones que requiere disminuyen la diferencia en el precio con respecto a los otros materiales existentes en el mercado.

#### 4.2 Evaluación de materiales para conformar suelos

Tras haber descrito los principales materiales que es posible utilizar en la construcción del suelo de una casa de tiro, se ha realizado una evaluación de los mismos a través de la herramienta utilizada en Ingeniería de la Calidad 'radar chart' [23], enfocada en este caso a la búsqueda de los mejores materiales existentes en el mercado. Esta evaluación se basa en analizar las propiedades de los materiales asignándoles una puntuación en función del valor que presenten para cada una de las propiedades. Dicho proceso queda detallado en el Anexo F. Estas puntuaciones quedan reflejadas posteriormente en un gráfico que finalmente permite calificar a los materiales.

Los resultados de este análisis se expresan en el gráfico de la Ilustración 6:



*Ilustración 6: Radar chart suelos. Fuente: elaboración propia*

Para esta evaluación se han estudiado cuatro propiedades asociadas con los materiales presentados en la Tabla 1 (el módulo elástico, el límite elástico, la resistencia mecánica y la dureza). Las puntuaciones obtenidas en la tabla están comprendidas en un intervalo de 0 a 5 (siendo 0 el valor inferior y 5 el valor superior). En función del valor numérico que presentasen los materiales de la Tabla 1 para cada una de las propiedades se les ha asignado una puntuación dentro de este intervalo. Así, como ejemplo, al valor del límite elástico ( $\sigma_Y$ ) del suelo de caucho vulcanizado ( $2 \times 10^7$  Pa) se le ha asignado una puntuación de 5.

Como puede observarse en el gráfico de la Ilustración 6, el caucho vulcanizado es sin duda el material más completo, presentando un módulo y un límite elástico muy superiores a los otros materiales; mientras que su dureza y resistencia mecánica muestran valores muy similares al resto. Como conclusión, se deduce que el caucho vulcanizado es un excelente material para conformar el suelo de una casa de tiro. Esta clase de caucho supone una inversión inicial superior a la que se pudiera realizar en cauchos naturales, pero el mantenimiento a lo largo de su vida útil es muy inferior, ya que la vulcanización del caucho reduce en gran medida el desgaste del material.

#### 4.3 Materiales propuestos para conformar paredes

Las paredes constituyen el elemento de las casas de tiro que más impactos sufre durante el uso de la instalación. Esto se debe a que los blancos u objetivos a los que hacer puntería se sitúan enfrente de las paredes, de forma que cuando se dispara a uno de ellos el proyectil lo atraviesa y termina impactando contra la pared<sup>5</sup>. Generalmente las paredes y muros de esta clase de instalaciones están construidos a base de hormigón, material que no evita el rebote de los proyectiles. Como consecuencia, las paredes deben estar forradas con un material antirebote, garantizando así la seguridad.

<sup>5</sup> Los blancos suelen estar fabricados de poliestireno expandido (porexpan).

En la Tabla 2 ‘Materiales paredes’ se muestran las propiedades de los materiales más utilizados actualmente para proteger los paramentos verticales de impactos balísticos.

| TABLA 2<br>(MATERIALES PAREDES) |                                                    | PROPIEDADES                                    |                                  |                            |                                 |                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|
|                                 |                                                    | COMPOSICIÓN                                    | DENSIDAD<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | DUREZA<br>SHORE<br>(Sh° A) | RESISTENCIA<br>MECÁNICA<br>(Pa) | VIDA ÚTIL<br>(disparos por<br>m <sup>2</sup> ) |
| MATERIALES                      | LOSETA DE CAUCHO<br>ANTIREBOTE                     | GRANULADO DE<br>CAUCHO CON<br>POLIURETANO      | 1060                             | 80                         | 2,5 x 10 <sup>7</sup>           | 100000                                         |
|                                 | CORTINA<br>ANTIFRAGMENTOS                          | HULE LÁTEX                                     | 950                              | 35                         | 2 x 10 <sup>7</sup>             | 50000                                          |
|                                 | LÁMINAS DE<br>CAUCHO                               | CAUCHO<br>NATURAL<br>YSINTÉTICO                | 150                              | 45                         | 1,6 x 10 <sup>7</sup>           | 50000                                          |
|                                 | LOSETA DE CAUCHO<br>ANTIREBOTE CON<br>LANA DE ROCA | CAUCHO CON<br>POLIURETANO<br>Y LANA DE<br>ROCA | 1060                             | 80                         | 2,5 x 10 <sup>7</sup>           | 100000                                         |

Tabla 2: Materiales paredes. Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1 Loseta de caucho antirebote

En primer lugar, es necesario destacar sus altas prestaciones. Estas losetas están creadas a partir de granulado de caucho ligado con una capa de poliuretano [24] cuyo fin es aumentar considerablemente su resistencia mecánica, concretamente su resistencia a la abrasión<sup>6</sup>.

Por otro lado, posee la dureza más elevada con un valor de 80 Sh° A [24]. Esto le otorga una mayor capacidad para resistir el impacto de un proyectil sin deformarse. Presenta también la mayor resistencia mecánica ( $\sigma_R$ ), con un valor de 2,5 x 10<sup>7</sup> Pa. Ambas características lo convierten en uno de los materiales idóneos para conformar una casa de tiro.

En cuanto a seguridad, presenta una resistencia al fuego de clase M3<sup>7</sup> [24]. Esta clase incluye material con un grado de inflamabilidad media. Por este motivo se aplica una capa de poliuretano sobre el caucho, con el fin de proporcionar a la loseta un mayor grado de impermeabilidad y una limpieza más sencilla de los restos de pólvora. Además, las losetas pueden presentar una forma ondulada para dificultar el rebote de los proyectiles, obligando a estos a impactar con un ángulo determinado.

<sup>6</sup> Tras realizar el correspondiente ensayo de determinación de la abrasión superficial de las baldosas esmaltadas (según la norma Organización Internacional de Estandarización o en inglés International Standardization Organization (ISO) 10545-7), se obtiene un valor de 130 revoluciones.

<sup>7</sup> En función de su comportamiento ante el fuego, los materiales se clasifican en cinco clases: M0, M1, M2, M3 y M4.

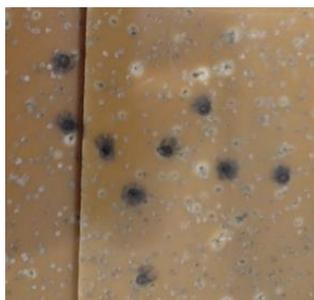
Es posible encontrar en el mercado una variante en la configuración de estas losetas de caucho. Se trata del uso de lana de roca. Instalándola se consigue romper la onda sonora provocada por el proyectil que impacta contra el caucho. La disposición de los materiales queda de la siguiente forma:

- Primeramente se disponen los paramentos verticales del edificio (muros, paredes, etcétera).
- A continuación se emplaza la lana de roca de 40 mm de espesor.
- Tras la lana de roca se colocan unos rastreles de madera sobre los que irán fijadas las placas de caucho.
- Por último se encuentra la pared de caucho ondulado antirebote. De este modo se crea una cámara de aire entre el caucho y la lana de roca que favorece la absorción tanto del ruido como de los proyectiles que sobrepasen el caucho.

#### 4.3.2 Cortina antifragmentos

Otro tipo de parabalas existente en el mercado es la cortina antifragmentos. Se trata de una serie de láminas creadas a partir de látex natural de 1,5 m de ancho, 3 m de altura y 4 mm de espesor, colgadas mediante unos soportes del techo. Se colocan de forma sucesiva superponiendo los extremos de forma que cubran todos los extremos.

La mayor ventaja de estas láminas es la capacidad que poseen de, una vez traspasado el proyectil tras el impacto en la cortina, cerrarse el orificio de entrada impidiendo que el proyectil o las esquirlas de este reboten [25], como se muestra en la Ilustración 7.



*Ilustración 7: Orificios cerrados tras la entrada de proyectiles.  
Fuente: elaboración propia.*

Esta capacidad está asociada al alargamiento de rotura [14]. Este se define como la diferencia existente entre la longitud inicial de un material sin deformar y la longitud presentada por dicho material en el momento de su rotura tras someterle a una tensión (alcanzando la resistencia mecánica). Este alargamiento se mide en tanto por ciento. Para el látex es de hasta el 350%, lo que le confiere dicha capacidad.

Tras la cortina se sitúan generalmente unos bloques de arena de sílice, con el objetivo de retener los proyectiles que atraviesan el látex y proteger la estructura interior de la instalación.

Relacionado con sus propiedades mecánicas [26], resaltar la elevada elasticidad que posee este material, lo que le proporciona una gran capacidad para absorber los impactos y evitar cualquier clase de rebote. Contribuye también en este sentido su resistencia mecánica ( $2 \times 10^7$  Pa), siendo la más alta de todos los materiales expuestos en la Tabla 2.

La vida útil de estos parabalas es de 50000 disparos por  $m^2$  de cortina. Sin embargo, no es posible cambiar solo una parte del látex que conforma cada una de las láminas, por lo que se si se alcanzase este límite se haría necesario cambiar la lámina entera.

No conlleva un mantenimiento exigente ni se requiere un alto desembolso para su instalación. De este modo, es apta para su uso en una casa de tiro, siendo posible su instalación en las paredes interiores.

#### 4.3.3 Láminas de caucho

El sistema de parabalas de caucho [27] está conformado por un conjunto de láminas delgadas de neumáticos reciclados sin ningún componente metálico [28] colgadas del techo a través de unos soportes. Para ser efectivo el conjunto, deben instalarse entre 40 y 50 láminas por cada metro lineal en cada hilera de parabalas (se establecen dos hileras). De este modo, los proyectiles que impactan contra el parabalas terminan siendo reducidos por las diferentes láminas.

Presenta la desventaja de necesitar una lámina de acero balístico de 8 mm de espesor tras el parabalas, cuya función es evitar que los proyectiles dañen la estructura interior del edificio en caso de no ser frenados por las láminas de caucho. No obstante, la mayor desventaja de este material tiene que ver con la imposibilidad de poder realizar disparos con calibre 5,56 mm. Esto se debe a que la máxima energía que es capaz de soportar el parabalas es de 500 julios, mientras que la energía desprendida al disparar un proyectil de calibre 5,56 mm es de 1767 julios. Este inconveniente limita la posibilidad de usar este tipo de material en casas de tiro.

#### 4.4 Evaluación de materiales para conformar paredes

De nuevo, se utiliza la herramienta 'radar chart' [23] para evaluar las propiedades de los materiales. La asignación de puntuaciones se muestra en el Anexo F.

Como producto de este estudio se han obtenido los resultados indicados en la Ilustración 8:



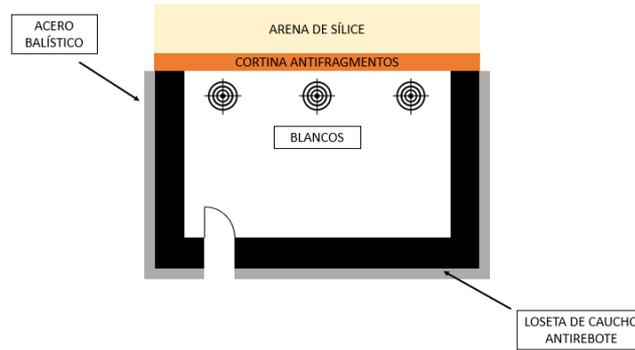
*Ilustración 8: Radar chart paredes. Fuente: elaboración propia.*

Se han analizado tres parámetros en este gráfico: en primer lugar la resistencia mecánica, posteriormente la dureza, que como en los suelos es determinante en la resistencia de los materiales frente a impactos; y por último la vida útil, factor muy importante en las paredes puesto que se trata del elemento que más impactos recibirá. Las puntuaciones obtenidas en el gráfico de la Ilustración 8 son también el resultado de asignarles a cada uno de los valores de la Tabla 2 un número del 0 al 5 (siendo 0 el valor inferior y 5 el valor superior). A raíz del análisis de la gráfica se deduce que la loseta de caucho antirebote, con o sin lana de roca (misma dureza, resistencia mecánica y vida útil), presenta valores superiores al resto de materiales. Esto indica que es la mejor opción para impedir el rebote de los proyectiles.

No obstante, se ha llegado a la conclusión de que una combinación de losetas de caucho junto con una cortina antifragmentos es la mejor solución, ya que se combina la capacidad de frenado del proyectil de las losetas y la gran capacidad antirebote que posee el látex de las cortinas (presentando una resistencia mecánica muy similar a la loseta de caucho e impidiendo que los proyectiles vuelvan a traspasar el material una vez atravesada la cortina). Concretamente, la instalación de la cortina antifragmentos en la pared situada tras los blancos y las losetas de caucho en el resto de las paredes. Como consecuencia, los paramentos verticales de la instalación no se ven perjudicados, lo cual sí ocurriría si la protección fuese a base de cortinas de látex.

La instalación de la lana de roca en las losetas de caucho supone un coste innecesario. Como se estudiará posteriormente en el proyecto, el establecimiento de un techo capaz de absorber el ruido es suficiente para evitar el fenómeno del eco.

Seguidamente se muestra en la Ilustración 9 la configuración de las paredes de una posible habitación perteneciente a una casa de tiro:



*Ilustración 9: Configuración paredes habitación casa de tiro.  
Fuente: elaboración propia.*

#### 4.4 Materiales propuestos para conformar techos

Existen dos posibles conformaciones del techo para garantizar la seguridad de los usuarios.

- Techo Herakustik: techo capaz de absorber el ruido compuesto por varios paneles solapados creados a partir de fibras extrafinas de madera de abeto aglomerados con cemento Portland. No es un material antirebote. Requiere por tanto una protección especial a base de losetas de caucho antirebote contra posibles impactos. Su condición de techo fono absorbente imposibilita la aparición del eco, evitando así confusiones en cuanto a los disparos capaces de causar un accidente entre los tiradores. Presenta un módulo de elasticidad de  $1,08 \times 10^{10}$  Pa y una resistencia mecánica de  $280 \times 10^3$  Pa. No se trata por tanto de un material elástico que cumpla funciones antirebote, sino de uno necesario para evitar accidentes.
- Ausencia de techo (casa descubierta): esta opción abarata el coste económico de la instalación. Sin embargo, se hace necesario proteger las inmediaciones de la instalación rodeándola de una serie de espaldones de tierra de gran altura en los que impacten los proyectiles despedidos de la casa de tiro. Aparte, conlleva un coste de mantenimiento mayor puesto que la instalación no queda protegida del viento y de las lluvias, deteriorándose con mayor velocidad los materiales.

## 5. SIMULACIÓN IMPACTO BALÍSTICO EN MATERIALES

Se presenta a continuación una simulación realizada con ABAQUS CAE, un programa de simulación tipo CAE (Ingeniería Asistida por Ordenador o en inglés

‘Computer-Aided Engineering’) basado en el análisis de elementos finitos. Este programa de visualización 3D permite estudiar toda clase de problemas: físicos, termodinámicos, etcétera.

En la simulación se han estudiado tensiones [29], deformaciones y desplazamientos de una placa creada a partir del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de los diferentes materiales, analizando así su resistencia a los impactos balísticos y por ende su capacidad antirebote. Se ha estudiado únicamente la resistencia ante impactos de proyectiles con calibre 5,56 mm, dado que la presión ejercida por estos es mucho mayor que la que puede llegar a ejercer un proyectil de calibre 9 mm<sup>8</sup>.

En concreto se ha realizado la simulación con los tres materiales considerados como ideales para crear las paredes una casa de tiro. El primer material examinado es el caucho antirebote. Su elección se basa en dos razones:

- Tras el estudio desarrollado en los apartados 4.3 ‘Materiales propuestos para conformar paredes’ y 4.4 ‘Evaluación de materiales para conformar paredes’ se ha observado que es el material que mejores prestaciones ofrece. Es por ello por lo que, junto con una lámina de acero balístico y un muro de hormigón armado HA-25, debe ser el material empleado.
- Este material ofrece la posibilidad de ser implantado tanto en paredes como en suelos. Su uso combinado presenta una gran ventaja: las paredes sufren un número de impactos muy superior al recibido por los suelos, dado que los tiradores son más propensos a desviarse lateralmente que en dirección vertical (arriba o abajo). Consecuentemente el desgaste es mayor en las paredes. Cuando el revestimiento de las losetas de las paredes esté próximo a la finalización de su vida útil, estas pueden ser empleadas para conformar el suelo, de manera que el número de impactos recibidos sea menor y su duración mayor. De este modo se consigue evitar o por lo menos mermar el gasto en la compra de material para conformar el suelo.

Posteriormente se ha investigado el comportamiento frente a impactos del látex natural utilizado en las cortinas antifrags. Su elevada resistencia mecánica, su escaso mantenimiento y su facilidad de instalación y recambio son algunas de las características que lo convierten en el material idóneo. No obstante, la mejora en la

---

<sup>8</sup> Esto se debe a la mayor velocidad otorgada a los proyectiles por los fusiles que disparan un calibre 5,56 mm y a la menor superficie que presentan dichos proyectiles en comparación con los de 9 mm, ejerciendo como resultado mayor presión.

seguridad que confiere su capacidad para impedir rebotes sellándose por sí solo tras perforarlo un proyectil, es la principal razón por la que se analiza el material.

Para terminar con la simulación se estudiará la resistencia del techo Herakustik a los impactos, demostrando así que es necesaria la protección especial de este tipo de cubierta. Sin embargo, a pesar de no ser un material antirebote, debe ser empleado dada su gran capacidad para absorber el ruido, incrementado así la seguridad.

Por otro lado, se ha aplicado una carga puntual en el centro de la placa de valor absoluto  $4,3 \times 10^7$  Pa, simulando el impacto de una bala de calibre 5,56 mm que ejerce su máxima presión sobre el material estudiado (cuando la bala impacta perpendicularmente a la placa). Los cálculos para determinar la carga quedan detallados en el Anexo G.

Para todos los estudios realizados se ha impuesto la condición de que el desplazamiento en el eje Z (eje correspondiente a la dirección de aplicación de la carga) de las cuatro aristas que conforman las placas analizadas sea igual a 0, con el objetivo de simular una pared arriostrada tanto a vigas como a pilares.

### 5.1 Loseta de caucho antirebote

Para esta simulación se ha tenido en cuenta la configuración real que presenta la pared de una casa de tiro, compuesta por el caucho antirebote de 40 mm de espesor, la lámina de acero balístico [30], [31] de 8 mm capaz de frenar aquellos proyectiles que consigan atravesar el caucho y el hormigón armado HA-25 [32], [33] de 50 cm, el cual evitará cualquier desplazamiento de la lámina de acero. Se ha creado un material a partir de la media aritmética de los módulos de elasticidad y los coeficientes de Poisson de los tres elementos mencionados anteriormente, detallada en el Anexo H. Por lo que respecta al espesor de la placa, se ha realizado el sumatorio de los espesores de los tres elementos, mostrado también en el Anexo H. Como resultado, se han obtenido los siguientes parámetros, introducidos posteriormente en el programa:

- Módulo de elasticidad:  $7,737 \times 10^7$  Pa
- Coeficiente de Poisson: 0,347
- Dimensiones de la placa estudiada: 0,5 x 1 m
- Espesor de la placa estudiada: 0,548 m
- Carga (valor absoluto):  $4,3 \times 10^7$  Pa

Tras realizar la simulación del programa, se han obtenido los resultados representados en la Ilustración 10:

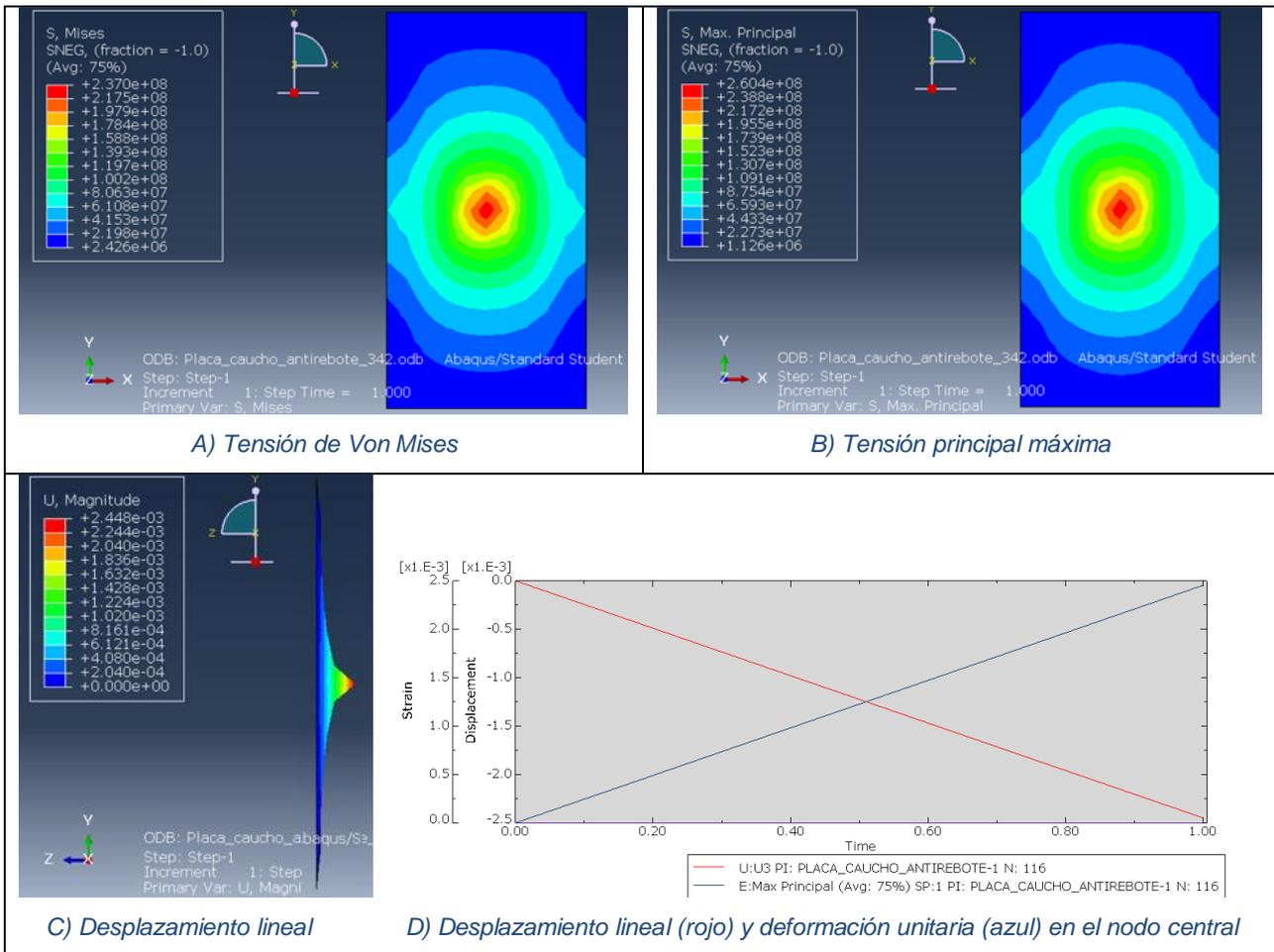


Ilustración 10: Caucho antirebote. A) Tensión de Von Mises B) Tensión principal máxima C) Desplazamiento lineal D) Desplazamiento lineal (rojo) y deformación unitaria (azul) en el nodo central

En primer lugar se ha observado la tensión de Von Mises [34], [35]. Esta tensión hace referencia al estudio conjunto de las tensiones de tracción y cortadura que se producen en un objeto. Se utiliza como tensión de comprobación frente a la resistencia mecánica del material (máximo de la tensión en la gráfica de tensión-deformación). Se obtiene a partir de la siguiente fórmula [13]:

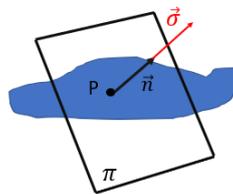
$$\sigma_{CO} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_y^2 + \tau_z^2)}$$

donde  $\sigma_x$  es la tensión normal y  $\tau_y$  y  $\tau_z$  son las componentes de la tensión cortante.

Como puede observarse en la Ilustración 10 (A), la tensión de Von Mises máxima se produce en el punto de aplicación de la carga (punto en el que impactaría la bala). Esta tensión es de  $2,370 \times 10^8$  Pa, llegando a superar el límite elástico del caucho antirebote, muy similar al del caucho vulcanizado ( $2 \times 10^7$  Pa), y generándose una deformación plástica e irreversible en el caucho. Supera también su resistencia

mecánica ( $2,5 \times 10^7$  Pa), por lo que en caso de alcanzarse esta tensión podría llegar a producirse la rotura del material, debiéndose realizar una sustitución inmediata.

Se ha analizado también la tensión principal [36] máxima ejercida sobre la placa. Las tensiones principales son aquellas que siguen la dirección de un vector ortogonal  $\vec{n}$  a un plano  $\pi$  que contiene a un punto P de un cuerpo y en el que las tensiones tangenciales son nulas, quedando únicamente la tensión normal  $\vec{\sigma}$  con valor distinto de cero [37] (ver Ilustración 11). Concretamente, para cada punto existen tres planos de este tipo, por lo que existen tres tensiones principales de entre las cuales una presentará un valor mayor, denominándola tensión principal máxima.



*Ilustración 11: Tensión principal  $\vec{\sigma}$ . Fuente: elaboración propia.*

En este caso, como se muestra en la Ilustración 10 (B) es de  $2,604 \times 10^8$  Pa. Este valor excede la resistencia mecánica ( $2,5 \times 10^7$  Pa), lo que indica que el material puede llegar a fracturarse.

Se ha estudiado también el desplazamiento  $\Delta_L$  (U en el programa) de la placa tras el impacto de la bala (ver Ilustración 10 (C)). A raíz de este estudio se demuestra cómo disminuye el desplazamiento causado cuanto más alejado se está del punto de aplicación de la carga (en los extremos es de  $2,04 \times 10^{-4}$  m y aumenta según la proximidad al centro de la placa). El desplazamiento máximo se produce en el nodo central con un valor de 2,448 mm, alcanzándose dicho valor durante la duración de la carga (1 s). El desplazamiento en el nodo central aumenta progresivamente según el gráfico de la Ilustración 10 (D) 'Desplazamiento lineal (rojo) en el nodo central'.

Por último, se ha examinado la deformación unitaria  $\varepsilon$  [38] (ver Ilustración 10 (D)). Esta deformación muestra la variación de longitud de un material (diferencia entre la longitud inicial y final) por unidad de longitud ( $\frac{\Delta L}{L}$ ). La máxima en este caso se ejerce en el punto en que se aplica la carga, obteniéndose un valor de 2,454. La deformación sigue un crecimiento lineal hasta alcanzar dicho valor, expuesto en el gráfico de la Ilustración 10 (D) 'deformación unitaria (azul) en el nodo central'.

## 5.2 Hule látex

Para evaluar el hule látex empleado en la cortina antifragmentos se han introducido los siguientes parámetros:

- Módulo de elasticidad: 874500 Pa
- Coeficiente de Poisson: 0,5
- Dimensiones de la placa estudiada: 1,5 x 3 m
- Espesor de la placa estudiada: 0,004 m
- Carga (valor absoluto):  $4,3 \times 10^7$  Pa

Para el análisis de este modelo se ha tenido en cuenta que tras el conjunto de las cortinas antifragmentos debe colocarse un bloque de arena de sílice en el que queden retenidos los proyectiles que atraviesen el látex.

Los resultados extraídos tras la simulación se muestran en la Ilustración 12:

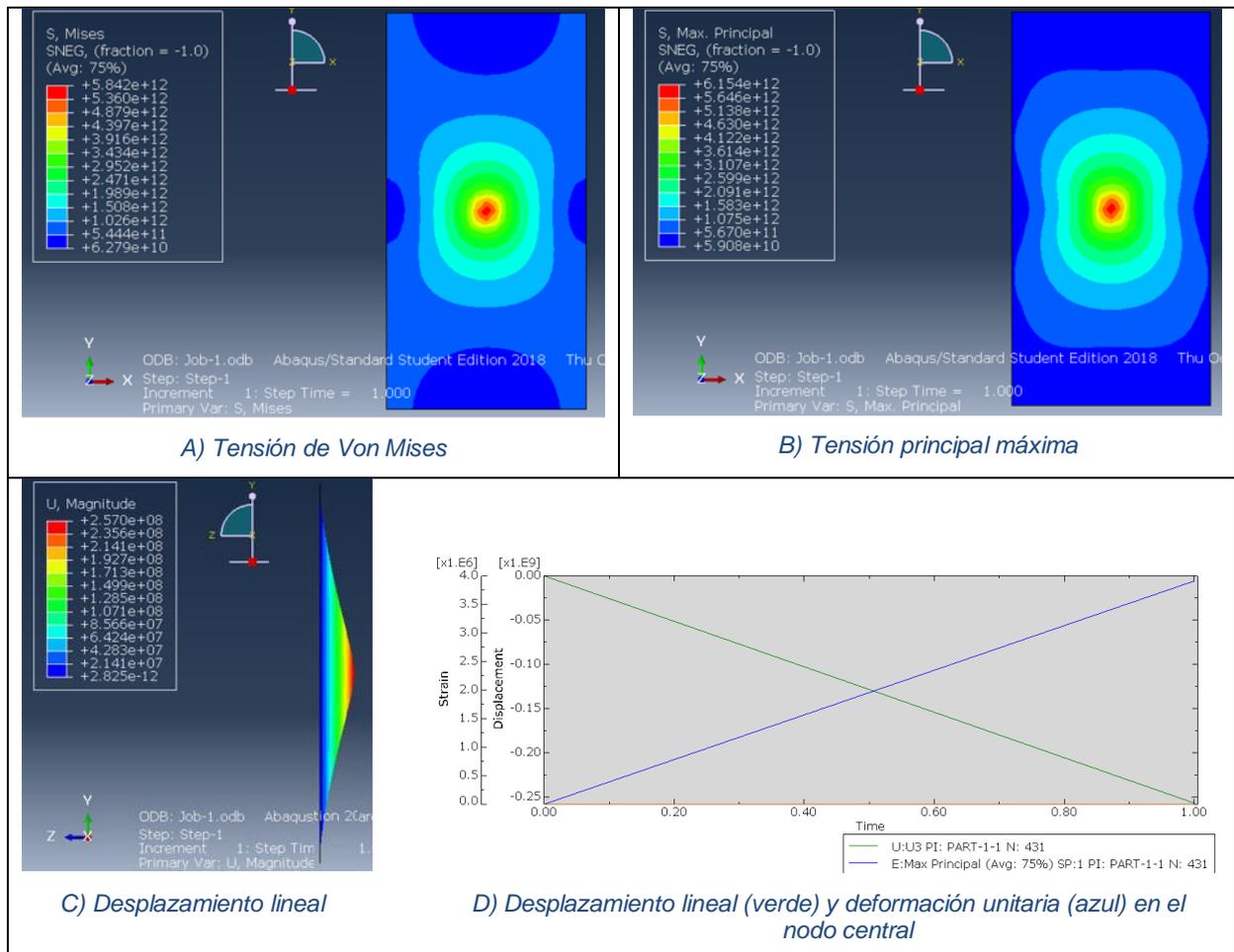


Ilustración 12: Hule látex. A) Tensión de Von Mises B) Tensión principal máxima C) Desplazamiento lineal D) Desplazamiento lineal (verde) y deformación unitaria (azul) en el nodo central

Inicialmente se ha observado de nuevo la tensión de Von Mises, la cual presenta unos valores muy superiores a los obtenidos en el caucho antirebote (ver Ilustración 12 (A)). Esto se debe a las elevadas tensiones de tracción y cortadura a las que se ve sometido el látex tras el impacto de una bala. Concretamente, presenta un valor máximo de  $5,842 \times 10^{12}$  Pa. Comparando este valor con el de la resistencia mecánica ( $2 \times 10^7$  Pa), se concluye que se producirá la rotura del látex. Esto no supone un problema de seguridad, puesto que como se indica anteriormente, tras el látex se sitúa un bloque de arena donde se detienen los proyectiles.

A partir del análisis de la tensión principal máxima (ver Ilustración 12 (B)) se determina también que puede llegar a producirse la rotura del látex, ya que el valor de esta tensión en cualquier punto de la cortina supera al de la resistencia mecánica ( $6,154 \times 10^{12}$  Pa  $>$   $2 \times 10^7$  Pa).

En contraste con el caucho antirebote, el desplazamiento  $\Delta_L$  en el látex presenta unos valores sumamente elevados, mostrados en la Ilustración 12 (C). Estos resultados se deben a la gran capacidad elástica del látex y a su alargamiento de rotura del 350% (ver apartado 4.3.2 Cortina antifragmentos).

Igualmente, el desplazamiento máximo se produce en el centro de la placa, consiguiéndose un valor máximo de  $2,570 \times 10^8$ . En el gráfico 'Desplazamiento lineal (verde) en el nodo central' de la Ilustración 12 (D) puede observarse como el desplazamiento en el punto de aplicación de la carga crece también linealmente durante su aplicación. No obstante, no es tan pronunciada la diferencia en el desplazamiento entre los distintos puntos de la cortina, como ocurría en el caucho.

La deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) producida también es muy superior a la del caucho antirebote, obteniéndose un valor en el centro de la cortina de  $3,91 \times 10^6$  (ver gráfico de la Ilustración 12 (D) 'deformación unitaria (azul) en el nodo central'). El motivo por el que está deformación es tan elevada tiene que ver con la elasticidad del látex. Se trata de un material que tiene la capacidad de deformarse cuando se aplica sobre él una fuerza. Está conformado a partir de largas cadenas poliméricas enrolladas que poseen la capacidad de desenredarse y estirarse en gran medida respecto a su longitud inicial [39]. Posteriormente, una vez deja de aplicarse dicha fuerza recupera su forma original.

### 5.3 Techo Herakustik

Finalmente, se ha estudiado el comportamiento del techo Herakustik. Para llevar a cabo la simulación se insertaron los siguientes parámetros:

- Módulo de elasticidad:  $1,08 \times 10^{10}$  Pa

- Coeficiente de Poisson: 0,5
- Dimensiones de la placa estudiada: 0,6 x 1,2 m
- Espesor de la placa estudiada: 0,035 m
- Carga (valor absoluto):  $4,3 \times 10^7$  Pa

Resaltar que se trata de un material anisótropo [40] (sus propiedades varían según la dirección en que se mida dicha propiedad en el material). Por ello, el coeficiente de Poisson varía. En este caso se ha estudiado en la dirección radial [41], dirección perpendicular a la cara expuesta del panel de techo, indicada en la Ilustración 13.



Ilustración 13: Dirección radial [41].

Como resultado de la simulación, se ha creado la Ilustración 14:

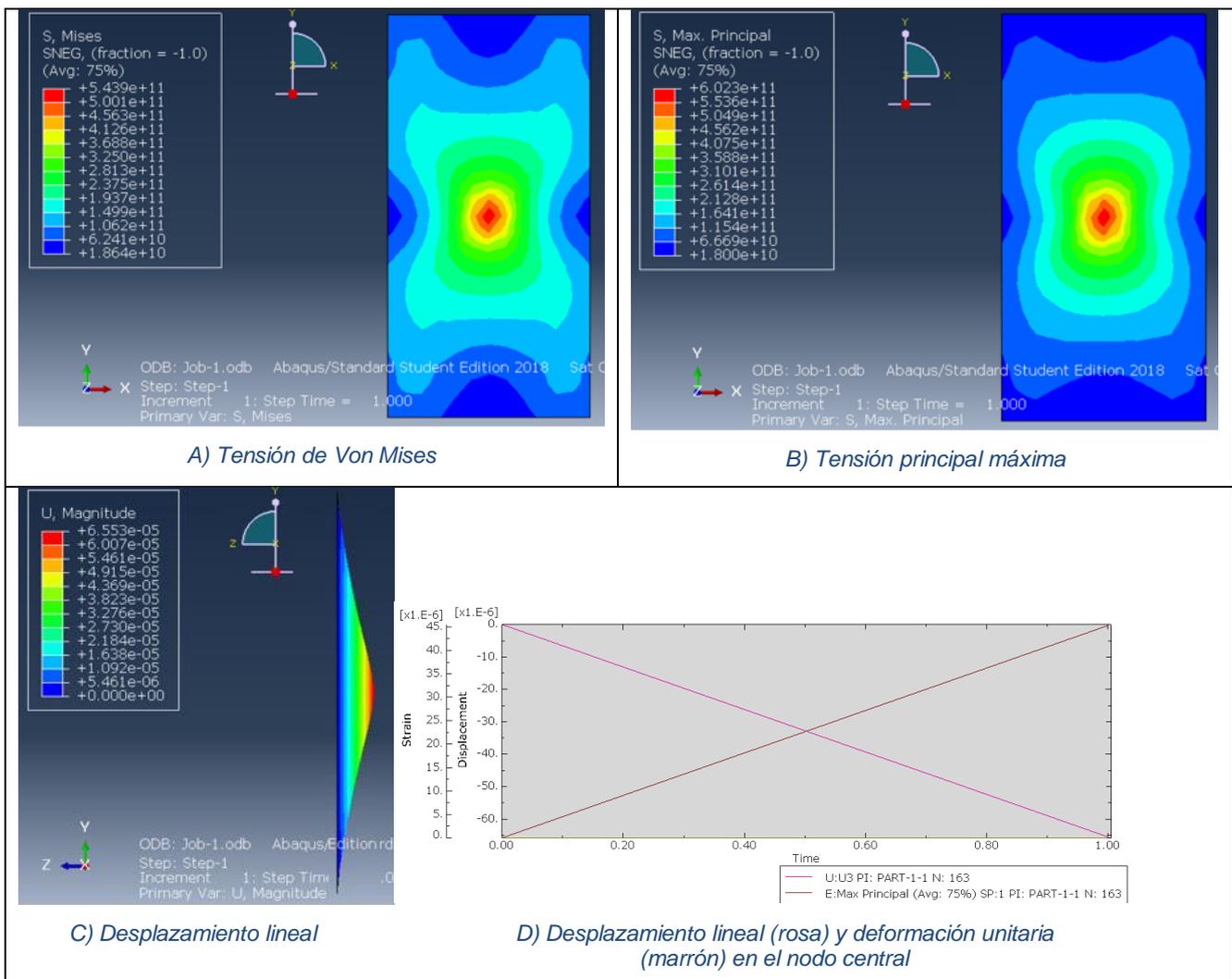


Ilustración 14: Techo Herakustik. A) Tensión de Von Mises B) Tensión principal máxima C) Desplazamiento lineal D) Desplazamiento lineal (rosa) y deformación unitaria (marrón) en el nodo central

La tensión de Von Mises, como se muestra en la Ilustración 14 (A), alcanza unos valores elevados, siendo el máximo de  $5,439 \times 10^{11}$  Pa. Este valor es muy superior a su resistencia mecánica de  $280 \times 10^3$  Pa. Como consecuencia, como se indica en el apartado 4.4 'Materiales propuestos para conformar techos', se hace necesario el uso de una protección especial para evitar su rotura. A diferencia de los otros dos materiales estudiados, puede observarse cómo la tensión no disminuye de forma violenta en los puntos de la placa más alejados del centro, sino que se mantiene una tensión similar en todo el material. Esto se debe a la baja elasticidad que presenta el material.

La tensión principal máxima ejercida en la placa, expuesta en la Ilustración 14 (B), supera de nuevo ampliamente la resistencia mecánica del material ( $6,023 \times 10^{11} > 280 \times 10^3$  Pa). Este resultado demuestra una vez más la posibilidad de rotura.

Su escasa capacidad elástica se refleja también en los resultados ínfimos obtenidos en el desplazamiento  $\Delta_L$  del material tras el impacto del proyectil. Como se aprecia en el gráfico 'Desplazamiento lineal (rosa) en el nodo central' de la Ilustración 14 (D), el desplazamiento máximo es de 0,066 mm, alcanzándose este valor en el centro de la placa tras la aplicación de la carga.

Por último, se ha analizado también la deformación unitaria  $\varepsilon$ , obteniéndose resultados muy inferiores a los extraídos en los dos materiales anteriores, con una deformación unitaria máxima en el punto de aplicación de la carga de  $4,528 \times 10^{-5}$ , expuesta según el gráfico 'deformación unitaria (marrón) en el nodo central' de la Ilustración 14 (D).

El motivo por el que estos dos últimos valores son tan inferiores tiene que ver con la estructura de las macromoléculas que forman el material. Presentan un alto grado de entrelazado, el cual impide que sean capaces de sufrir cambios de forma mediante presión [39].

## 6. CONCLUSIONES

Desde las primeras visitas realizadas a galerías y calles de tiro hasta la simulación ante impactos desarrollada en el apartado 5 'SIMULACIÓN IMPACTO BALÍSTICO EN MATERIALES', se ha pasado por diferentes fases para completar la elaboración del trabajo. Un análisis del estado actual de este tipo de instalaciones en España, una detallada comparación de los posibles materiales que podemos encontrar en el mercado y una simulación exhaustiva relacionada con la capacidad de los materiales para resistir

un impacto balístico, constituyen los hitos seguidos para extraer las siguientes conclusiones:

- **Primera:** la instrucción militar en casas de tiro es una actividad que conlleva un alto riesgo. Por ello, es necesario que los paramentos verticales y horizontales de la estructura estén revestidos por materiales antirebote. De lo contrario, pueden producirse graves accidentes. Durante el desarrollo de este trabajo se ha investigado en qué materiales pueden mitigar eficazmente la presión ejercida por una bala de calibre 5,56 o 9 mm evitando toda clase de rebotes.
- **Segunda:** la seguridad en una casa de tiro no solo tiene que ver con el uso de materiales antirebote. La porosidad resulta un factor fundamental en el momento de seleccionar el suelo a utilizar. Cuanto mayor sea el grado de porosidad más difícil se hace la limpieza de los restos de pólvora acumulados en el suelo. Como consecuencia, mayor es la probabilidad de que se produzca un incendio. Por otra parte, la absorción del ruido incrementa la seguridad de la instalación, ya que se evitan confusiones entre los usuarios de la instalación. Durante el desarrollo del trabajo se plantean dos posibilidades para reducir el ruido: la utilización de lana de roca en las paredes, capaz de romper la onda sonora originada por los disparos; o la implantación del denominado techo Herakustik, una cubierta de madera de abeto y cemento Portland capaz de absorber el ruido y evitar el fenómeno del eco.
- **Tercera:** tras la simulación realizada se concluye que el caucho, junto con sus diferentes variedades, es el material que mejores condiciones presenta para ser instalado en el suelo de una casa de tiro en la que se utilicen calibres 5,56 y 9 mm. Sus sobresalientes propiedades elásticas (presentando un elevado límite elástico y una elevada resistencia mecánica) permiten evitar cualquier tipo de rebote. Como se ha estudiado, la presión ejercida por un proyectil que impactase perpendicularmente contra el material puede llegar a producir su rotura. Se ha observado en la simulación que es posible que dicha presión supere la resistencia mecánica del material, llegando incluso a fracturarlo. Esto implicaría su consecutivo reemplazo por otra loseta de caucho nueva. No obstante, existen determinados materiales en el mercado cuya resistencia mecánica

es muy superior a la presión provocada por un proyectil del calibre estudiado, como el kevlar. Estos materiales no son objeto de estudio del trabajo dado su alto valor de adquisición.

- **Cuarta:** como resultado de la simulación se obtiene que tanto las losetas de caucho antirebote como el látex pueden llegar a fracturarse, dado que de nuevo se supera su resistencia mecánica tras un impacto. De este modo, se hace necesario el uso de elementos protectores tras el material antirebote, como los bloques de arena de sílice. Se consigue así evitar también la adquisición de un único material como el kevlar cuyo valor económico sea muy superior al del caucho capaz de evitar los rebotes sin que resulte atravesado.
- **Quinta:** se ha evidenciado durante la simulación la necesidad de proteger el techo Herakustik debido a su falta de elasticidad y resistencia ante impactos. Puede observarse como las tensiones producidas en el material son muy superiores a su resistencia mecánica. Sin embargo, debe utilizarse como medio de absorción acústica, dotándole de una protección que impida el impacto directo de los proyectiles.
- **Sexta:** la elasticidad del material está íntimamente relacionada con la estructura molecular que presenta. En función del grado de interconexión y del número de enlaces entre sus moléculas será capaz de soportar mayores o menores desplazamientos y deformaciones. Por ello, es necesario conocer si el material empleado se corresponde con un material termoplástico, elastómero o termoestable.
- **Séptima:** existe una carencia absoluta en el ejército en cuanto a la existencia de este tipo de instalaciones, no habiendo ninguna homologada en España. Dada su utilidad como herramienta para instruir a las tropas en el combate en población, debe realizarse un esfuerzo en reacondicionar las instalaciones existentes.

## 7.BIBLIOGRAFÍA

- [1] TacticalOnline, “Action Target Líder en instalaciones de tiro,” 2017.
- [2] R. Dronne, “¿Cómo diferenciar los distintos calibres de las armas de fuego?,” 2015.
- [3] M. de Defensa, “FUSA HK,” 2012.
- [4] E. Villarejo, “HK G36: El fusil que jubiló al Cetme,” 2014.
- [5] S. Defensa y Seguridad, “Pistola HK USP STANDARD CAL. 9mm PB.”
- [6] D. E. Defensa, “INSTALACIONES PARA LA INSTRUCCIÓN CON FUEGO REAL EN INTERIOR DE EDIFICIOS ( CASA DE TIRO ),” 2006.
- [7] M. Salinas, “Proyecto básico y de ejecución de la galería de tiro para la policía local de orihuela (alicante),” 2008.
- [8] Heraklith, “Soluciones de aislamiento Heraklith para Techos y Suelos,” 2019.
- [9] J. Brasero Espada, “Caucho Natural Libres De N-Nitrosaminas ,” 2017.
- [10] A. Garcia Gasco, “Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación,” 2007.
- [11] C. Sanjuan Fernandez, “Medición de la dureza en materiales,” 2012.
- [12] U. P. de Valencia, “Ensayo de tracción: diagrama tensión-deformación,” 2011.
- [13] Material de apoyo U EAN, “Estabilidad li Capitulo I : Introducción a La Resistencia De Materiales Introducción a La Resistencia De Materiales,” no. li, pp. 1–24, 2004.
- [14] U. P. de Valencia, “Unidad 2. Características mecánicas de los materiales 2. Ensayo de tracción.”
- [15] Erica S.L., “Caucho de Poliuretano.”
- [16] S. D. E. S. Ciudadana, “Galería de Tiro Tradeseegur.”
- [17] Educarm, “Propiedades físicas del suelo.”
- [18] A.Y.Coran, “Vulcanization,” 2013.
- [19] Mariano, “Vulcanización,” 2012.
- [20] G. Castro, “MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO,” *Diciembre*, pp. 1–57, 2008.
- [21] Mecalux, “Aspirador industrial trifásico para la limpieza de pólvora.”
- [22] C. Martínez, “Control de calidad en la Industria del Caucho I Parte,” *Inf. Técnico*, vol. 71, p. 18, 2007.

- [23] Centro Universitario de la Defensa, “Calidad. Tema 6 Calidad en Compras,” 2016.
- [24] FIXER, “Ficha técnica loseta galería de tiro,” pp. 2–3, 2014.
- [25] P. D. E. Laminas and D. E. C. D. E. Metros, “Cortina antifragmentos,” p. 14.
- [26] J. A. Rayas and R. Rodr, “Medicion del modulo de Young en el hule latex usando ESPI,” vol. 49, no. 6, pp. 555–564, 2003.
- [27] GomaVial Parabalas, “Parabalas de Cortina,” vol. 66, pp. 37–39, 2012.
- [28] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), “Ficha técnica,” no. 23, pp. 1–20, 2010.
- [29] Federación de enseñanza de CC OO de Andalucía, “Tipos De Esfuerzos Físicos,” *Temas para la Educ.*, pp. 1–18, 2011.
- [30] A. T. TAVANTZIS, “Modulo de young y coeficiente de poisson para distintos materiales,” p. 1, 1987.
- [31] M. de Defensa, “Nuevo acero balístico,” 2013.
- [32] J. P. Valcárcel, “EHE-2008 EHE-98,” 2008.
- [33] U. P. M. L.-H. Sánchez, J.L; Mateos, I; Díaz, B; Cobo, A; Escuela Técnica Superior de Edificación, “Coeficiente de Poisson hormigones.” pp. 182–183, 2016.
- [34] U. de N. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, “3. Cargas Estáticas 3.1.,” pp. 45–54, 2004.
- [35] C. Santiuste, “Criterios de fallo,” 2015.
- [36] Universidad de Chile, “Introduccion al estado de tensiones,” pp. 1–22.
- [37] C. Santiuste, “Tensiones y direcciones principales,” 2015.
- [38] J. Huauya A., “Deformacion Unitaria,” 2013.
- [39] Mando de Adiestramiento y Doctrina, “Departamento de Técnica Militar,” pp. 367–369, 2019.
- [40] A. E. H. Love, “Conceptos de isotropía y de anisotropía, también de textura.,” *New York*, vol. 1, p. 2, 2014.
- [41] D. Systemes, “Materiales isotrópicos y ortotrópicos,” 2011.
- [42] DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS, “Introducción al Durometro,” 2015.
- [43] G. Castro, “REUTILIZACION, RECICLADO Y DISPOSICION FINAL DE NEUMATICOS,” 2007.

## **ANEXOS**

- A. Cuestionario de investigación
- B. Planos casa de tiro
- C. Porosidad
- D. Determinación de la dureza Shore
- E. Vulcanización
- F. Cálculos radar chart
- G. Cálculo carga ejercida sobre la placa
- H. Media aritmética y espesor de la loseta de caucho antirebote

## ANEXO A: Cuestionario de investigación.

## **CUESTIONARIO DE INVESTIGACIÓN**

### **GALERÍA DE TIRO**

#### **SHOOTING RANGE (ZARAGOZA)**

El presente cuestionario se realiza con la finalidad de recibir asesoramiento por parte del personal trabajador en la galería de tiro Shooting Range (Zaragoza) en cuanto a la resistencia expuesta por los diferentes materiales que componen las salas de tiro en las que se hace uso de munición real.

A continuación se presenta la relación de preguntas formuladas al director jefe de la galería:

#### **Cuestionario:**

**Nombre: José Manuel**

**Apellidos: Agudo Tejada**

**Puesto de trabajo: director jefe de 'Shooting Range'.**

### **SEGURIDAD**

**1. ¿Qué materiales emplean para conformar las paredes y evitar el rebote de los proyectiles?**

Se emplea tanto el caucho vulcanizado como el látex. No obstante, la parte trasera de la galería está conformada a partir de caucho vulcanizado junto con una cristalera blindada con visión directa a la sala de recepción. La puerta de acceso a la galería es de acero balístico.

**2. ¿Qué materiales emplean para conformar el techo para evitar el rebote de los proyectiles?**

Se emplea un techo denominado 'Herakustik', creado a partir de un 65% de fibras de madera de abeto y un 35% de cemento Portland.

**3. ¿Qué materiales emplean para conformar el suelo para evitar el rebote de los proyectiles?**

Se emplean unas losetas de caucho natural antirebote muy similares a las empleadas en las paredes laterales.

**4. De qué forma consiguen reducir el riesgo de incendio como consecuencia de los restos de pólvora desprendidos por los proyectiles?**

Los restos de pólvora desprendidos por los proyectiles quedan depositados en el suelo. Todos estos restos se limpian posteriormente a través de un aspirador industrial trifásico que imposibilita cualquier combustión.

**5. ¿De qué forma consiguen retirar los restos de plomo perjudiciales para la salud desprendidos por los proyectiles?**

A través de un sistema de ventilación que permite 32 renovaciones/hora del aire, siendo este sistema capaz de eliminar la totalidad de los restos de plomo.

**MANTENIMIENTO**

**6. ¿Cada cuánto tiempo se hace necesario renovar el material de la sala de tiro debido al deterioro causado por el impacto de los proyectiles?**

Dependiendo del material y del número de impactos que haya recibido se cambia el material cada un determinado período de tiempo.

**7. ¿Depende el desgaste del material del calibre que se utilice en la galería?**

Sí, en función del calibre utilizado el material sufrirá más o menos desgaste. Como ejemplo puede observarse el orificio de entrada causado por las balas de diferentes calibres en la cortina de látex, mostrados en la Ilustración 15.



*Ilustración 15: Orificios tras el impacto de distintos calibres.  
Fuente: elaboración propia.*

**8. ¿Cuál es el material que mayor desgaste sufre?**

El material que mayor desgaste sufre es la cortina de látex puesto que es el material que más impactos recibe, ya que está situada tras los blancos.

**9. ¿Qué entidad/organización se encarga de revisar el estado de los materiales?**

Es el propio personal de la galería de tiro el encargado de realizar la supervisión del estado de los materiales.

**MATERIALES**

**10. ¿Tiene importancia el ángulo con el que impacta el proyectil en el material?**

Sí, la presión ejercida por la bala en el material dependerá del ángulo con que esta impacte, pudiendo producirse tensiones y deformaciones muy distintas.

**11. ¿Existe una distancia mínima a partir de la cual se pueden efectuar disparos sobre el material?**

Para la galería de tiro la distancia mínima es de 10 m, pero no está relacionada con la seguridad, sino con la dificultad y destreza para hacer puntería (a menos de 10 m la dificultad es mínima).

En cuanto a la seguridad, debe hacerse un uso lógico de las armas, no disparando nunca a distancias muy reducidas (inferiores a 1 m).

**12. ¿Cómo influye el grado de permeabilidad de los materiales utilizados en los suelos?**

Cuanto mayor es la porosidad de los suelos mayor dificultad requieren para limpiarlos ya que los restos de pólvora pueden quedar depositados en los propios poros. Estos restos deben ser completamente eliminados ya que pueden llegar a provocar un incendio.

**13. ¿Se ven afectados los paramentos verticales y horizontales de las instalaciones (muros, pilares, vigas, etcétera) por el impacto de los proyectiles contra los materiales antirebote?**

Generalmente no, ya que en la galería se colocan tras las paredes unas láminas de acero balístico de 8 mm de espesor capaces de proteger todos estos elementos.

**14. ¿Existe algún material capaz de absorber el ruido causado por los proyectiles al ser disparados?**

Sí, por ejemplo el techo Herakustik empleado en el techo de la galería reduce en gran medida el ruido provocado en el exterior de la galería.

### **LÍNEAS FUTURAS**

**15. ¿Existe la posibilidad de que en un futuro existan casas de tiro de carácter civil?**

Sí, siempre y cuando se respeten las medidas de seguridad necesarias y se haga un estudio detallado de los materiales a emplear para evitar cualquier rebote, así como del sistema de ventilación e iluminación.

**Gracias por su colaboración.**

**Zaragoza, a 24 de septiembre de 2019**

## ANEXO B: Planos casa de tiro.

## **PLANOS CASA DE TIRO**

Se muestra a continuación una posible configuración para una casa de tiro realizada con AutoCAD, un programa de diseño de tipo CAD (Diseño Asistido por Ordenador o en inglés 'Computer-Aided Design') capaz de dibujar proyectos relativos a la construcción y crear visualizaciones 2D y 3D.

Esta instalación forma en planta un cuadrado de 10 x 10 m, y está compuesta de una serie de habitáculos, los cuales simulan la distribución habitual de una vivienda, combinando pasillos con habitaciones, baños, salón, cocina, etcétera. Cuenta también con un observatorio elevado desde el que analizar los movimientos ejecutados por los usuarios y corregir así los diferentes errores. Este cuenta con una serie de ventanas blindadas que permiten la observación directa de cada uno de los habitáculos, ya que las paredes de la planta baja tienen una altura de 2,50 m, y su "techo" es la propia cubierta del edificio, cuyo punto más alto se encuentra a 6,50 m del suelo.

De esta forma se hace muy difícil el impacto directo de un proyectil. Aun así, se estima necesaria la instalación del techo Herakustik para evitar el eco.

Por otro lado, la existencia de huecos a modo de "ventanas" obliga a la colocación de espaldones de arena que rodeen la instalación al completo, con el objetivo de retener los proyectiles despedidos por ellas.

La instalación cuenta con dos accesos. El denominado 'acceso de usuarios' desde el que las personas que se instruyen entran en la casa; y otra entrada denominada 'acceso principal' desde la que se accede directamente al puesto de observador.

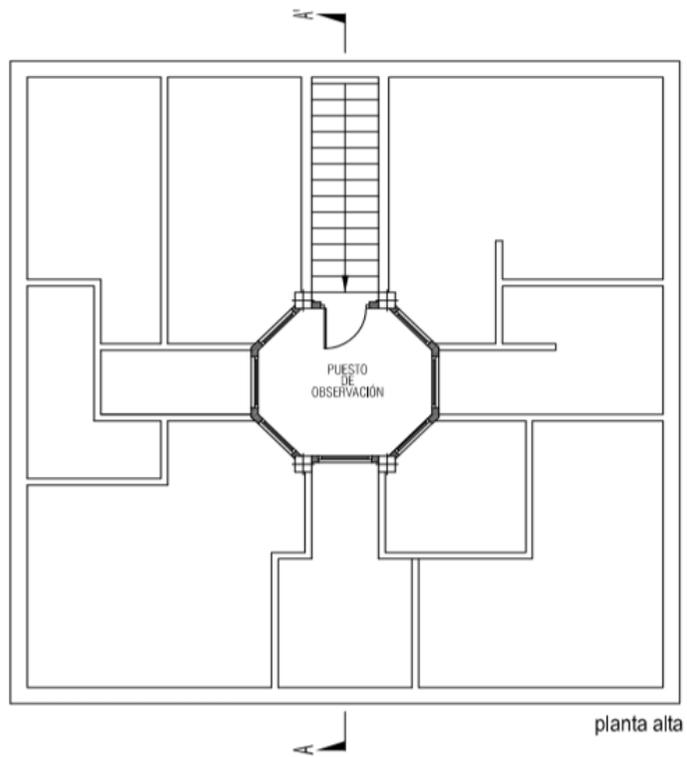
La disposición de los habitáculos se ha diseñado de tal manera que resulte complejo el aseguramiento completo de la casa, dada la dificultad que exige la limpieza<sup>9</sup> de las habitaciones directamente conectadas con el distribuidor. Esto es beneficioso para la instrucción, ya que los combatientes se ven sometidos a la situación más complicada posible.

De este modo, la configuración de la casa de tiro descrita es la siguiente:

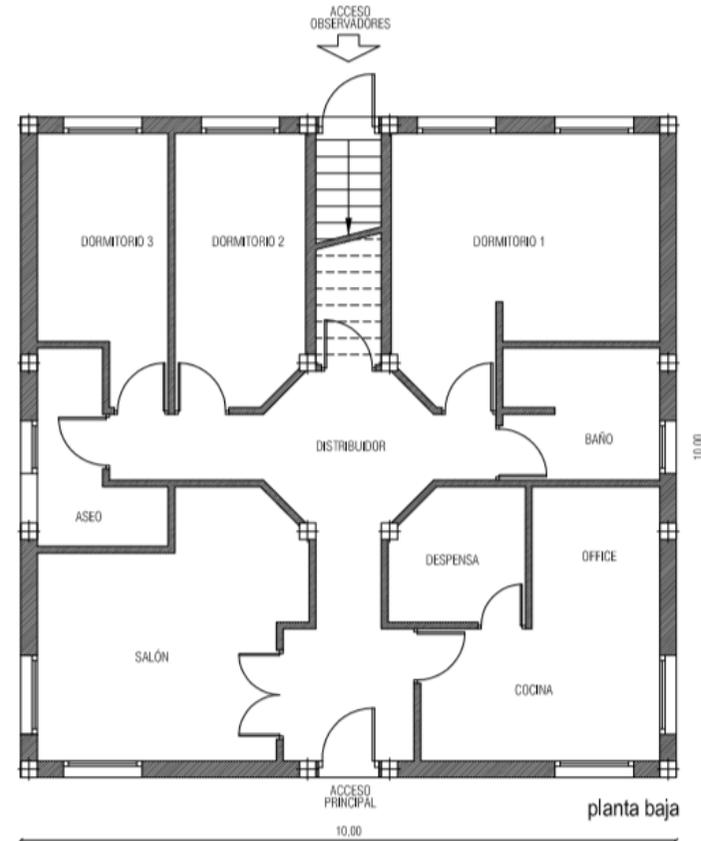
---

<sup>9</sup> La limpieza de un habitáculo consiste en garantizar la seguridad de la habitación, eliminando cualquier clase de riesgo. Un habitáculo se considera 'limpio' cuando no existe ningún peligro en su interior.

**PROYECTO DE CASA DE TIRO**



planta alta



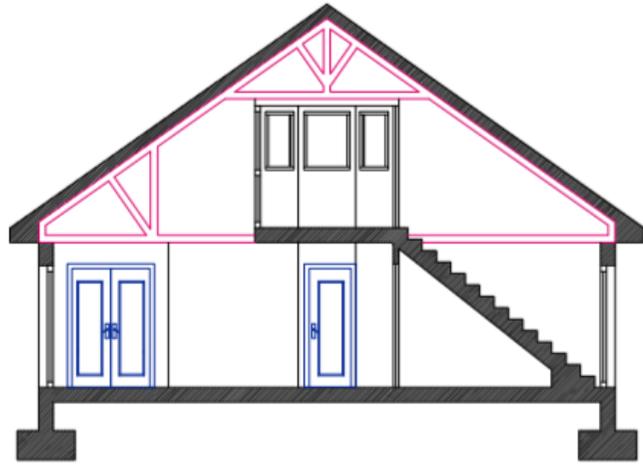
planta baja

*Ilustración 1.- planta alta*

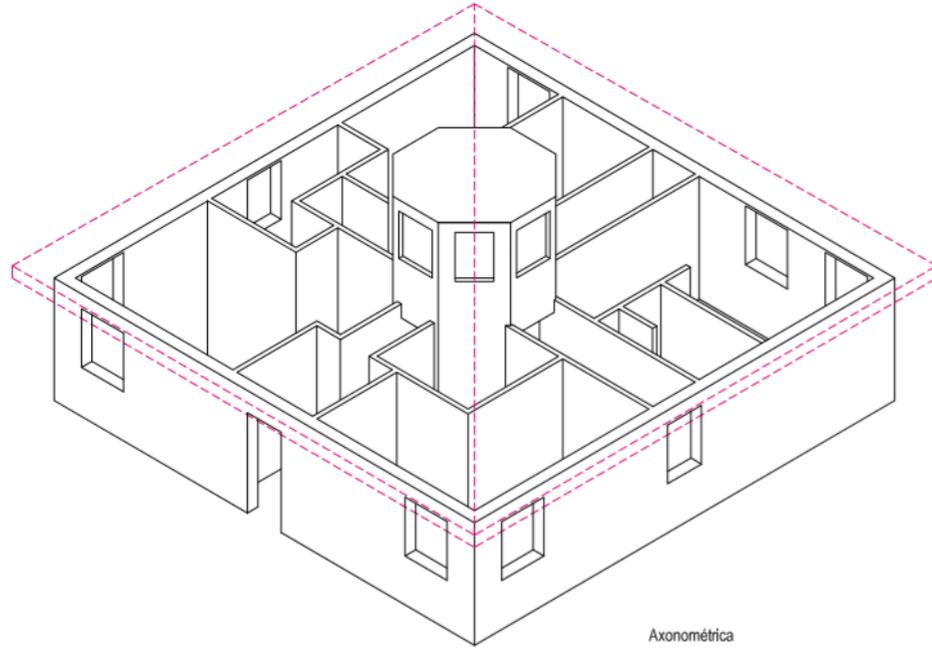
*Ilustración 2.- planta baja*

|                                                                                     |            |                                      |              |                     |        |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|--------|-----------|
|  | <b>AGM</b> | AUTOR DEL PROYECTO                   | FECHA        | PLANO DE:           | ESCALA | PLANO N.º |
|                                                                                     |            | <b>C.A.C. FERNANDO VALERO OTONÍN</b> | OCTUBRE 2019 | PLANTAS BAJA y ALTA | 1/100  | 1         |

**PROYECTO DE CASA DE TIRO**



sección A - A'



Axonométrica

*Ilustración 3.- sección*

*Ilustración 4.- axonométrica*



AGM

AUTOR DEL PROYECTO

**C.A.C. FERNANDO VALERO OTONÍN**

FECHA

OCTUBRE 2019

PLANO DE:

**AXONOMÉTRICA y SECCIÓN**

ESCALA

1/100

PLANO N.º

**2**

## ANEXO C: Porosidad.

## POROSIDAD

La porosidad hace referencia al volumen de espacios o huecos vacíos que contiene un material con respecto a su volumen total. En función del tamaño y del grado de intercomunicación entre los mismos queda determinada la mayor o menor porosidad. Este valor influirá directamente en la dificultad para limpiar los suelos. Cuanto menor sea el número y el tamaño de los poros más sencilla será la limpieza, puesto que los restos de pólvora causados por los proyectiles quedan depositados en los huecos.

La porosidad puede obtenerse a través de la siguiente expresión:

$$P = \left( \frac{V_p}{V_0} \right) \times 100 = \left( \frac{V_0 - V_{sólidos}}{V_0} \right) \times 100$$

donde:

$P$  (%) es la porosidad del material

$V_p$  (m<sup>3</sup>) es el volumen de poros

$V_0$  (m<sup>3</sup>) es el volumen total de la muestra

$V_{sólidos}$  (m<sup>3</sup>) es el volumen de las partículas sólidas

Puede expresarse también la porosidad a partir de la densidad global del material ( $\rho_0$ ) y la densidad de los sólidos ( $\rho_{sólidos}$ ) teniendo en cuenta los siguientes principios:

- La masa global del material ( $m_0$ ) es la misma independientemente de que se tenga o no en cuenta el volumen ocupado por los poros, ya que se trata de espacios vacíos que no contienen materia ( $m_0 = m_{sólidos}$ ).
- $\rho = \frac{m}{V}$

donde:

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) es la densidad del material

$m$  (kg) es la masa del material

$V$  (m<sup>3</sup>) es el volumen del material

Por lo tanto, la porosidad de un material:

$$\begin{aligned}
 P &= \left( \frac{V_0 - V_{sólidos}}{V_0} \right) \times 100 = \left( 1 - \frac{V_{sólidos}}{V_0} \right) \times 100 = \left( 1 - \frac{\frac{m_0}{V_0}}{\frac{m_{sólidos}}{V_{sólidos}}} \right) \times 100 = \\
 &= \left( 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{sólidos}} \right) \times 100
 \end{aligned}$$

donde:

$m_0$  (kg) es la masa global del material

$m_{sólidos}$  (kg) es la masa de los sólidos

$\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) es la densidad global del material

$\rho_{sólidos}$  (kg/m<sup>3</sup>) es la densidad de los sólidos

Queda así definida la porosidad de un material, a partir de lo que se denomina densidad real (densidad sin tener en cuenta los poros) ( $\rho_{sólidos}$ ) y la densidad aparente (densidad teniéndolos en cuenta) ( $\rho_0$ ).

## ANEXO D: Determinación de la dureza Shore.

## DUREZA SHORE

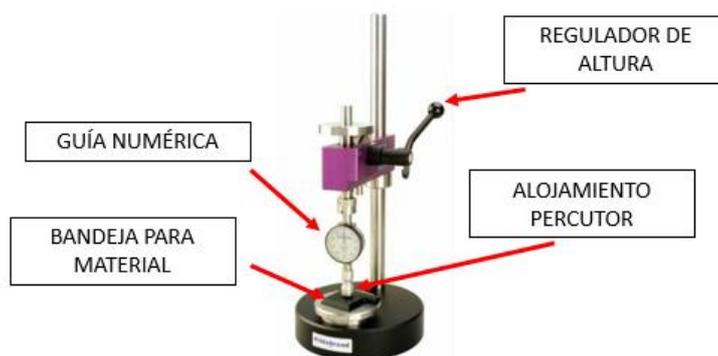
Existen diferentes unidades de medida de la dureza. Para la realización de este trabajo se ha empleado la dureza Shore. Para llevar a cabo su medición se emplea un durómetro como el introducido en la Ilustración 16, desarrollando el siguiente procedimiento:

- Se deja caer sobre el material desde una altura de 250 mm un percutor de acero.
- Tras impactar el percutor en el material, este rebota alcanzando una determinada altura que será calculada a través de una guía numérica.

En función de su dureza, el material absorberá una mayor o menor cantidad de energía en el impacto del percutor (cuanto más blando sea el material mayor será la energía absorbida). La energía no absorbida será la utilizada por el percutor para rebotar y obtener cierta altura. De esta forma, según la altura lograda se determinará la dureza del material.

El ensayo debe realizarse varias veces en diferentes puntos del material con el objetivo de promediar finalmente los resultados obtenidos.

Existen distintas escalas de medida relacionadas con el tipo de material a estudiar (escalas A, B, C, D, DO, O, OO, OOO). En este trabajo se ha hecho uso de la escala A, la cual confiere a gomas blandas, plásticos y elastómeros. La unidad de medida en esta escala es el Shore A (Sh° A).

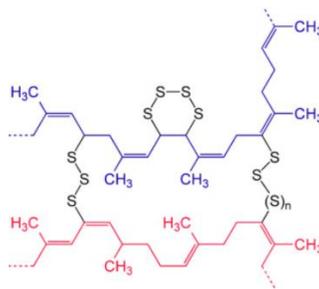


*Ilustración 16: Durómetro para dureza Shore [42].*

## ANEXO E: Vulcanización.

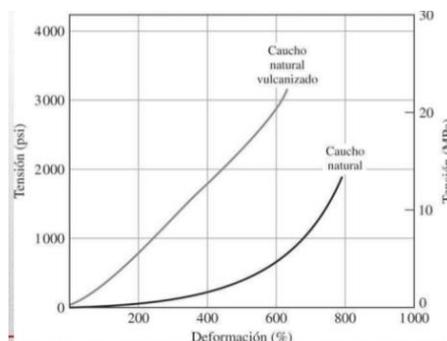
## VULCANIZACIÓN

La vulcanización consiste en la reconversión del caucho (material termoplástico [39]) en un elastómero [39]. Estos se caracterizan por ser polímeros amorfos con una importante capacidad de deformación. Esto se debe a sus estructuras lineales con arrollamientos (causa de su elasticidad) y entrecruzamiento parcial. Además, una vez cesada la carga que provoca su deformación, recuperan su forma original. Para obtener el caucho vulcanizado se produce el entrecruzamiento de los polímeros del caucho con moléculas de azufre (a través de enlaces covalentes) a elevada temperatura (entre 140 y 160 °C) y presión, obteniéndose la estructura indicada en la Ilustración 17. Se hace uso de acelerantes durante el proceso de vulcanización como óxidos de zinc y plomo con el objetivo de aumentar la velocidad de la reacción. En función del número de átomos de azufre que consigan enlazar con el caucho se obtendrán unas propiedades u otras en el caucho vulcanizado. Así, para obtener una elevada capacidad de deformación y flexión el número de átomos de azufre en los entrecruzamientos debe ser alto.



*Ilustración 17: Entrecruzamiento caucho y azufre [19].*

Como puede observarse en la comparativa realizada entre los diagramas de tensión-deformación del caucho natural y del caucho vulcanizado mostrada en la Ilustración 18, el caucho natural presenta una deformación mucho mayor a medida que se aumenta la tensión, extrayéndose como conclusión que tras el vulcanizado, el caucho presenta mejores propiedades elásticas y plásticas.



*Ilustración 18: Comparativa caucho natural y vulcanizado [43].*

## ANEXO F: Cálculos radar chart.

## CÁLCULOS RADAR CHART

Con el objetivo de identificar aquellos materiales que mejores condiciones ofrecen para ser implantados en una casa de tiro, se ha hecho uso de la herramienta 'radar chart'. Para ello, se ha establecido un sistema de puntuaciones basado en los valores numéricos presentados por los materiales para cada una de las propiedades.

De este modo, la asignación de puntuaciones para los materiales que conforman los suelos se ha realizado siguiendo las siguientes tablas:

Para la dureza Shore:

| VALOR DE LA DUREZA SHORE (Sh° A) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|----------------------------------|---------------------|
| 20                               | 1                   |
| 40                               | 2                   |
| 60                               | 3                   |
| 80                               | 4                   |
| 100                              | 5                   |

Para el límite elástico:

| VALOR DEL LÍMITE ELÁSTICO (Pa) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|--------------------------------|---------------------|
| $4 \times 10^6$                | 1                   |
| $8 \times 10^6$                | 2                   |
| $12 \times 10^6$               | 3                   |
| $16 \times 10^6$               | 4                   |
| $20 \times 10^6$               | 5                   |

Para la resistencia mecánica:

| VALOR DE LA RESISTENCIA MECÁNICA (Pa) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|---------------------------------------|---------------------|
| $6 \times 10^6$                       | 1                   |
| $12 \times 10^6$                      | 2                   |
| $18 \times 10^6$                      | 3                   |
| $24 \times 10^6$                      | 4                   |
| $30 \times 10^6$                      | 5                   |

Para el módulo elástico:

| VALOR DEL MÓDULO ELÁSTICO (Pa) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|--------------------------------|---------------------|
| $4 \times 10^6$                | 1                   |
| $8 \times 10^6$                | 2                   |
| $12 \times 10^6$               | 3                   |
| $16 \times 10^6$               | 4                   |
| $20 \times 10^6$               | 5                   |

Como puede observarse, los valores determinados para asignar las puntuaciones se obtienen multiplicando el primer valor de la tabla por un número natural (comenzando por el 1 y terminando por el 5). Así, por ejemplo, para el módulo elástico los distintos valores se consiguen multiplicando el primer valor ( $4 \times 10^6$ ) por un número natural (1, 2, 3, etcétera):

$$4 \times 10^6 \times 1 = 4 \times 10^6$$

$$4 \times 10^6 \times 2 = 8 \times 10^6$$

$$4 \times 10^6 \times 3 = 12 \times 10^6$$

$$4 \times 10^6 \times 4 = 16 \times 10^6$$

$$4 \times 10^6 \times 5 = 20 \times 10^6$$

Para la asignación de puntuaciones de los materiales utilizados en paredes se han creado las tablas expuestas a continuación:

Para la dureza Shore:

| VALOR DE LA DUREZA SHORE (Sh° A) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|----------------------------------|---------------------|
| 20                               | 1                   |
| 40                               | 2                   |
| 60                               | 3                   |
| 80                               | 4                   |
| 100                              | 5                   |

Para la resistencia mecánica:

| VALOR DE LA RESISTENCIA MECÁNICA (Pa) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|---------------------------------------|---------------------|
| $6 \times 10^6$                       | 1                   |
| $12 \times 10^6$                      | 2                   |
| $18 \times 10^6$                      | 3                   |
| $24 \times 10^6$                      | 4                   |
| $30 \times 10^6$                      | 5                   |

Para la vida útil:

| VALOR DE LA VIDA ÚTIL (Disparos/m <sup>2</sup> ) | PUNTUACIÓN ASIGNADA |
|--------------------------------------------------|---------------------|
| 20000                                            | 1                   |
| 40000                                            | 2                   |
| 60000                                            | 3                   |
| 80000                                            | 4                   |
| 100000                                           | 5                   |

El sistema desarrollado para establecer los valores que marcan las puntuaciones es el mismo que el empleado para los suelos. Como ejemplo, para la vida útil:

$$20000 \times 1 = 20000$$

$$20000 \times 2 = 40000$$

$$20000 \times 3 = 60000$$

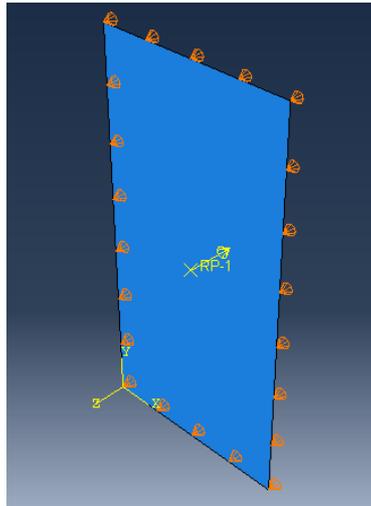
$$20000 \times 4 = 80000$$

$$20000 \times 5 = 100000$$

## ANEXO G: Cálculo carga ejercida sobre la placa.

## CÁLCULO CARGA EJERCIDA SOBRE LA PLACA

Para la ejecución de la simulación se ha aplicado una carga puntual en el centro de la placa de valor absoluto  $4,3 \times 10^7$  Pa. Esta carga se aplica en la dirección negativa del eje Z, como puede observarse en la Ilustración 19, por lo que su valor será de  $-4,3 \times 10^7$  Pa.



*Ilustración 19: Carga aplicada sobre la placa. Fuente: elaboración propia.*

El valor de esta carga ha sido calculado a partir de los datos ofrecidos a continuación, obtenidos tras consultar al personal de la galería de tiro Shooting Range, en el término municipal de Zaragoza:

- Diámetro de la punta de la bala:  $10^{-3}$  m
- Masa de la bala una vez disparada:  $4 \times 10^{-4}$  kg
- Velocidad inicial de la bala: 850 m/s

Así, para calcular la presión ejercida por la carga se han llevado a cabo los siguientes pasos:

En primer lugar se ha determinado la expresión para calcular dicha presión:

$$P = \frac{F}{S}$$

donde:

$P$  (Pa) es la presión ejercida por la carga

$F$  (N) es la fuerza ejercida por la bala

$S$  ( $m^2$ ) es la superficie de la punta de la bala

La fuerza producida por la bala sigue la expresión mostrada a continuación:

$$F = m a$$

donde:

$m$  (kg) es la masa de la bala una vez disparada

$a$  (m/s<sup>2</sup>) es la aceleración de la bala durante su vuelo

La aceleración se calcula partiendo de la siguiente fórmula:

$$a = a_0 + \frac{v}{t}$$

donde:

$a_0$  (m/s<sup>2</sup>) es la aceleración inicial de la bala

$v$  (m/s) es la velocidad de la bala durante su vuelo

$t$  (s) es el tiempo de vuelo de la bala

En cuanto a la velocidad  $v$  durante el vuelo, se considera que la bala mantiene su velocidad inicial de 850 m/s, puesto que la distancia que recorre en una casa de tiro será aproximadamente de 10 m (las habitaciones y pasillos presentan longitudes similares a 10 m), siendo esta una distancia en la que la velocidad inicial y final son prácticamente iguales.

Por lo que respecta al tiempo de vuelo, teniendo en cuenta que su velocidad inicial es de 850 m/s, la bala invierte 0,01 s aproximadamente en recorrer 10 m.

Por otra parte, la aceleración inicial de la bala  $a_0$  es nula ya que se encuentra inmóvil en el interior del cañón.

De este modo, la aceleración queda:

$$a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{850}{0,01} = 85000 \text{ m/s}^2$$

A continuación queda calculada la fuerza ejercida por la bala, una vez conocida la aceleración durante el vuelo y su masa una vez disparada:

$$F = m a = 4 \times 10^{-4} \times 85000 = 34 \text{ N}$$

Posteriormente se hace necesario calcular la superficie de la punta de la bala. Se trata de una circunferencia de radio  $R = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$ , por lo que la superficie queda:

$$S = \pi R^2 = \pi \times (0,5 \times 10^{-3})^2 = 7,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Una vez determinada la fuerza ejercida por la bala  $F$  y la superficie de su punta  $S$ , se procede a calcular la presión ejercida por la carga:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{34}{7,85 \times 10^{-7}} = 4,3 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 4,3 \times 10^7 \text{ Pa}$$

**ANEXO H: Media aritmética y espesor de la loseta  
de caucho antirebote.**

## MEDIA ARITMÉTICA Y ESPOR DE LA LOSETA DE CAUCHO ANTIREBOTE

Con el objetivo de extraer los mejores resultados posibles, para el análisis de la resistencia de la loseta de caucho se ha realizado una media aritmética tanto del módulo de elasticidad como del coeficiente de Poisson de los tres elementos que conforman las paredes en las que se instalan estas losetas (el hormigón HA-25, el acero balístico y el caucho). En cuanto a los espesores, se realizó la suma de ambos puesto que en una situación real quedarían solapados los materiales.

De este modo, los datos empleados para realizar la media aritmética fueron los siguientes:

| MATERIAL              | PROPIEDADES                      |                        |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------|
|                       | MÓDULO DE ELASTICIDAD<br>(Pa)    | COEFICIENTE DE POISSON |
| HORMIGÓN ARMADO HA-25 | $3,208 \times 10^{10}$ (28 días) | 0,27                   |
| ACERO BALÍSTICO       | $2 \times 10^{11}$               | 0,27                   |
| CAUCHO ANTIREBOTE     | $1724 \times 10^4$               | 0,5                    |

*Tabla 3: Media aritmética. Fuente: elaboración propia*

A partir de estos valores se calculó la media aritmética siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{Media } (X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Siendo  $X_1, X_2, \dots, X_N$  el conjunto de datos a estudiar.

Media aritmética módulos de elasticidad

$$E = \frac{3,208 \times 10^{10} + 2 \times 10^{11} + 1724 \times 10^4}{3} = 7,737 \times 10^{10}$$

Media aritmética coeficientes de Poisson

$$\nu = \frac{0,5 + 0,27 + 0,27}{3} = 0,347$$

Respecto a los espesores:

| MATERIAL              | ESPESOR (m) |
|-----------------------|-------------|
| HORMIGÓN ARMADO HA-25 | 0,5         |
| ACERO BALÍSTICO       | 0,008       |
| CAUCHO ANTIREBOTE     | 0,04        |

*Tabla 4: Espesores: Fuente: elaboración propia*

Sumándolos el resultado es de 0,548 m.