



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Protección balística en buques militares: estudio de costes y  
repercusión en consumos*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Pablo Antonio Gutiérrez Palomo

**DIRECTORES:** Elena Arce Fariña

TN Pedro Jesús Carrasco Pena

**CURSO ACADÉMICO:** 2019-2020

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Protección balística en buques militares: estudio de costes y  
repercusión en consumos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

El objetivo de la protección balística en los buques de guerra es proteger equipos y áreas críticas del barco. Para ello, atendiendo a las diferentes necesidades y requisitos que se den, hoy en día se dispone de diversos materiales con diferentes propiedades para cada tipo de situación, amenaza y cometido.

Debido a la existencia de esta multitud de materiales y propiedades, la elección del elemento más adecuado es una tarea compleja y necesita algo más que un análisis cuantitativo y objetivo. No necesariamente la protección balística de un buque de guerra radica en la elección de un solo material, sino que su selección puede verse condicionada por criterios menos objetivos y más heurísticos.

En el presente TFG se estudia un método para la elección del material más conveniente, empleando encuestas a las que se aplican técnicas de Decisión Multicriterio.

## **PALABRAS CLAVE**

Protección, Defensa, Balística, Blindaje, Materiales, AHP, MCDM, Multicriterio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Querría comenzar reconociendo a mis dos tutores, Doña Elena Arce Fariña y el Teniente de Navío Don Pedro Carrasco, el apoyo y la ayuda prestada para la elaboración de este trabajo de fin de grado. Agradezco enormemente su dedicación, más aún su constancia y esfuerzo durante estos meses, pero sobretodo agradezco la paciencia que me han dedicado desde el principio hasta el final.

Quiero también agradecer a todo aquel que se mostró generoso con esta causa: aquellos que no titubearon en contribuir con este trabajo y aquellos que se ofrecieron a prestar ayuda, por mínima que fuera, sin dudarlo.

A mis compañeros de promoción les reservo un muy especial abrazo, durante estos cinco años que hemos convivido juntos se han convertido en parte de mí y puedo decir orgulloso que son una extensión de mi familia.

Uno de los más fuertes sentimientos de agradecimiento se lo dedico a mis familiares y a mis padres, que han sido siempre ese bastón en el que poder apoyarme cada vez que he sentido tambalearme.

A la familia y amigos de Luis Gibert Guitart les ofrezco todo mi afecto. Durante las últimas semanas estas personas han supuesto para mí, junto con mis padres, un increíble ejemplo de templanza, constancia y unidad.

Por último, este trabajo se lo dedico a mi compañero y gran amigo, Luis Gibert. Aunque ya no estés, seguiremos siempre unidos.



## CONTENIDO

Contenido .....	4
Índice de Figuras .....	6
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos .....	9
1.1 Introducción .....	9
1.2 Objetivos .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Origen de los sistemas de protección y defensa.....	11
2.2 Historia del blindaje en el ámbito naval.....	12
2.3 Protección balística en la actualidad .....	15
2.4 La amenaza actual .....	16
2.4.1 Terrorismo .....	16
2.4.2 Piratería.....	16
2.4.3 Conclusiones sobre la amenaza .....	17
2.5 Tipos de materiales .....	17
2.5.1 Metales.....	17
2.5.2 Polímeros .....	18
2.5.3 Materiales cerámicos .....	18
2.5.4 Materiales compuestos.....	20
2.6 Métodos de decisión multicriterio.....	20
2.6.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP) .....	21
3 Desarrollo del TFG.....	23
3.1 Introducción a la metodología.....	23
3.2 Estructura del problema .....	24
3.3 Criterios seleccionados .....	25
3.4 Materiales y alternativas de aplicación en protección balística .....	26
3.4.1 Metales en protección balística.....	26
3.4.2 Cerámicas en protección balística .....	31
3.4.3 Polímeros en protección balística .....	33
3.4.4 Composites en protección balística .....	34
3.5 Proceso de obtención de la información .....	35
3.6 Descripción del método AHP .....	36
4 resultados.....	41

4.1 Descripción de la muestra obtenida .....	41
4.2 Método AHP .....	43
4.2.1 Ponderación de criterios .....	43
4.2.2 Ponderación de alternativas: panel de expertos .....	43
4.2.3 MCP's alternativa/criterio .....	44
4.2.4 Análisis de la consistencia .....	46
4.2.5 Matriz de prioridad global .....	48
4.2.6 Resultado AHP .....	48
4.3 Público seleccionado y respuestas obtenidas .....	50
4.3.1 Personal militar .....	51
4.3.2 Personal civil .....	52
5 Conclusiones y líneas futuras .....	55
5.1 Conclusiones .....	55
5.2 Líneas futuras .....	56
6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Encuestas Realizadas.....	61
Anexo II: Plantilla de excel para AHP .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ametralladora Browning M2 con placas protectoras laterales [3] .....	11
Figura 2-2. Trirreme griego con espolón en proa [5] .....	12
Figura 2-3. Esquema de la sección de un acorazado tipo pre-dreadnought. En rojo el cinturón blindado y se observa doble fondo en la parte inferior del casco. [6].....	13
Figura 2-4. Método Harvey para acero reforzado [7].....	14
Figura 2-5. Acorazado Bismarck tipo dreadnought (1941) [8] .....	15
Figura 2-6. Figura explicativa de la estructura jerarquizada en el método AHP [22].....	22
Figura 3-1. Proceso de realización del trabajo. Elaboración propia. ....	24
Figura 3-2. Diagrama estructura del problema. Confección propia. ....	25
Figura 3-3. Dos muestras de espumas de aluminio [26]. ....	29
Figura 3-4. Experimento balístico sobre placa de cerámica de alúmina-mullita con proyectiles de 7,62x51 mm disparados por una M16. Se producen seis impactos sin perforación en el material [28].	32
Figura 3-5. Propuesta de una placa de tres componentes hecha a partir de material cerámico [28]. .....	33
Figura 3-6. Representación del funcionamiento del grafeno ante impactos balísticos [29].....	35
Figura 3-7. Esquema de proceso de AHP. Elaboración propia. ....	37
Figura 3-8. Matriz de Comparación Pareada. Elaboración propia. ....	38
Figura 4-1. Ratio de participación militar/civil en la encuesta. Obtenido de Google Formularios..	41
Figura 4-2 Gráfico resultados AHP. ....	49
Figura 4-3. Participaciones en el personal militar. Obtenido de Google Informes. ....	51
Figura 4-4. Resultados AHP personal militar. ....	52
Figura 4-5. Diagrama de representación de la participación de civiles. Obtenido de Google Informes. ....	52
Figura 4-6. Resultados AHP personal civil (no consistente).....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Ventajas de los materiales cerámicos en aplicaciones industriales y estructurales [1]...	19
Tabla 2-2. Escala Saaty de comparaciones pareadas [20].....	21
Tabla 2-3. Ejemplo de valoración negativa. Confección propia. ....	22
Tabla 3-1. Ejemplos de aceros comerciales tipo MARS [23]. ....	27
Tabla 3-2. Límite balístico de aceros Armox con impacto de proyectil 7.62 x 39 mm AK-47 a 30 metros [24]. ....	27
Tabla 3-3. Comparación impacto por proyectil 7,62 APM2 30°. Confección propia, datos obtenidos de [1].....	28
Tabla 3-4. Ensayos balísticos sobre aleaciones de titanio y acero. ....	29
Tabla 3-5. Comparativa de Magnesio con otras aleaciones [1]. ....	30
Tabla 3-6. Resultados globales de pruebas balísticas [1]. ....	31
Tabla 3-7. Listado de Materiales y Documentación. Elaboración Propia. ....	36
Tabla 4-1 Correspondencia Escala propia/Escala Saaty. Elaboración propia. ....	42
Tabla 4-2. Matriz de comparación de los criterios. ....	43
Tabla 4-3. Relación de la idoneidad de los materiales con respecto a los criterios. Elaboración propia. ....	44
Tabla 4-4. MCP en relación al coste. ....	44
Tabla 4-5. MCP en relación al peso. ....	44
Tabla 4-6. MCP en relación a la Resistencia estructural. ....	45
Tabla 4-7. MCP en relación a la Calidad balística. ....	45
Tabla 4-8. Correspondencia de índices aleatorios en función del número de elementos [55]. ....	46
Tabla 4-9. CR máximo en función del número de variables [20]. ....	47
Tabla 4-10. Consistencia MCP de los criterios. ....	47
Tabla 4-11. Consistencia MCP de costes. ....	47
Tabla 4-12. Consistencia MCP de pesos. ....	47
Tabla 4-13. Consistencia MCP de resistencia estructural. ....	48
Tabla 4-14. Consistencia MCP de calidad balística. ....	48
Tabla 4-15. Matriz de prioridad global.....	48
Tabla 4-16. Vectores prioridad de las alternativas. ....	49
Tabla 4-17. Vector prioridad de los criterios.....	49
Tabla 4-18. Idoneidad de los materiales según encuesta (no consistente). ....	50
Tabla 4-19. Tabla de MCP de criterios con personal militar. ....	51
Tabla 4-20. Consistencia en MCP de criterios por personal militar.....	52
Tabla 4-21. Tabla de MCP de criterios con personal civil. ....	53



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

La protección balística en los buques ha sido siempre parte fundamental desde que se comenzaron a emplear blindajes a bordo de los barcos y con el surgimiento de los primeros buques de guerra blindados y acorazados durante el siglo XIX.

La expansión de la industria del acero durante este siglo logró un granel abaratamiento en los procesos de obtención y tratamiento de este. Hasta mediados del siglo XX este material era el único que se utilizaba en protección balística en la industria de defensa militar.

Es a partir de la década de los sesenta cuando comienza a utilizarse una mayor diversidad de materiales para blindaje de vehículos y buques militares. Esto vino a ser probablemente motivado por el rápido desarrollo de nuevas armas y munición con mayor capacidad perforante. Es por ello que, a partir de entonces, la protección balística toma aún mayor importancia en la preparación, diseño y construcción de las distintas unidades militares a nivel mundial.

A pesar de la creciente variedad de materiales para el empleo en blindajes, se debe destacar que el acero sigue siendo el material más extensamente utilizado, sobre todo en el ámbito naval, debido mayormente a su bajo coste en comparación con materiales más avanzados, pero de precio más elevado [1]. Con los crecientes avances en investigación, tanto en el acero de blindaje como en otros materiales aplicables al combate naval, se han mejorado y diversificado sus propiedades y características de cara a su resistencia a la fatiga, tenacidad, peso y dureza entre otras.

Debido a esta variedad de elementos aplicables a protección balística, existe bastante complejidad a la hora de seleccionar el material más apropiado para la necesidad que se pide. Además, cada material reúne una serie de criterios y características diferentes. Por lo tanto, para realizar una elección de tan suma importancia como lo es ésta, se hace necesario ejecutar un estudio previo que nos ayude a desengranar el problema y llegar así a la mejor conclusión.

Este estudio previo se puede optimizar de manera muy fiable mediante la combinación de varias técnicas que se denominan “Métodos de Decisión Multicriterio”. Estas técnicas se basan en procedimientos matemáticos y estadísticos que procuran argumentar científicamente la decisión más idónea por medio de porcentajes de idoneidad.

El trabajo que se va a realizar en este TFG radica en el empleo de estos métodos de decisión para concluir qué material será el más apropiado para la protección balística en los buques de la Armada Española, tanto para buques que se encuentren en estado de servicio como para nuevas adquisiciones y proyectos.

Los criterios sobre los que se basará la selección de dicho material serán en un principio dos: costes y consumos; pero será necesario incorporar más criterios para asegurar una selección eficiente y precisa. Estos criterios serán estudiados durante el desarrollo del proyecto.

## 1.2 Objetivos

Este trabajo tiene como objetivos los siguientes:

1. Exponer los distintos materiales empleados en la protección balística en el ámbito civil o militar, realizando especial énfasis en los de utilidad en buques tanto civiles como, especialmente, de guerra.
2. Definir los procesos de toma de decisiones. Focalizando en los Métodos de Decisión Multicriterio.
3. Recapitular en las conclusiones de forma argumentada en base a los métodos analizados

Para alcanzar estos objetivos, la metodología se basará en:

1. Un listado previo de los materiales más comunes empleados en la protección balística y cuales son los más apropiados para el contexto naval.
2. Tras esto, se hará una exposición de las propiedades y aplicaciones que tienen estos materiales en el mundo de la protección balística.
3. En cuanto a la hora de realizar la selección de los materiales más apropiados esta se apoyará en las herramientas de Decisión Multicriterio. Concretamente el método AHP.
4. Para emplear estas técnicas, será necesario disponer de bastante información verídica. Para ello se emplearán encuestas que ofrezcan la información relativa a las características que deben poseer los materiales que vayamos a emplear. Estas encuestas intentarán ser dirigidas a especialistas en la materia de protección balística o en el diseño de buques, de modo que se pueda reducir el error subjetivo al máximo posible.
5. Continuando con el proceso de selección, se determinarán los criterios sobre los que se basará la selección de los materiales. El título del TFG hace especial incisión en el coste y el consumo (el consumo podrá traducirse como el peso para hacer este criterio más fácilmente cuantificable). A lo largo del desarrollo del trabajo se enunciarán otros dos criterios para la selección del material.
6. Los cuatro criterios en conjunto serán empleados en los procesos de AHP y se decidirán mediante estos métodos su relevancia e interés para la materia que se estudiará.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Origen de los sistemas de protección y defensa

El ser humano a lo largo de su historia ha necesitado de distintos medios para protegerse tanto individual como colectivamente.

Los escudos fueron la herramienta de protección defensiva más utilizada por el hombre en los tiempos antiguos. Los primeros escudos datan de Mesopotamia alrededor del año 3000 a.C. [2]. Estos fueron primeramente fabricados a partir de la superposición de varias capas cuero y posteriormente de lino para dotarlos de resistencia frente a impactos de flechas y espadas. Más adelante se comenzaron a emplear algunos metales, como en los sumerios, que confeccionaban sus escudos con cuero y los reforzaban con láminas de cobre.

Con la revolución metalúrgica aparecen nuevos metales que ofrecieran mejores características. Así pues, se empezaron a emplear materiales metálicos más avanzados y con mejores propiedades, como el bronce, el hierro y más tarde el acero.

Hoy en día los escudos como tal los son empleados por unidades de seguridad como elemento de contención. Estos escudos normalmente son fabricados de policarbonato transparente y algunos de acero u otros materiales. Sin embargo, también se pueden encontrar otros tipos de escudos no portátiles formados a partir de diversos materiales como aceros, titanio u otros materiales compuestos (Figura 2-1).



Figura 2-1. Ametralladora Browning M2 con placas protectoras laterales [3]

Las murallas son el otro elemento defensivo que nació en la antigüedad. Estas se construían a partir de madera, piedra o algunos barros o arcillas.

Es de destacar el empleo del adobe para la construcción de murallas, que fue muy empleado en varias civilizaciones como en el antiguo Egipto. El adobe es un material que se elaboraba a partir de la mezcla de una base de barro con paja, se le daba forma de ladrillo y se secaba al sol [3]. Este material puede considerarse como el primer material compuesto (composite) de protección.

Con la invención de la pólvora, el diseño de las murallas cambia por completo para que su uso defensivo no quedara obsoleto, recurriéndose a murallas más bajas, pero de mayor grosor.

En la actualidad el uso de las murallas en el ámbito militar se simplifica únicamente a los búnkeres, hechos de gruesas paredes de acero y hormigón diseñadas a soportar grandes cantidades de impactos de proyectiles y explosivos.

Estos sistemas defensivos son los precursores de los sistemas de protección que se desarrollan actualmente. Con el avance de la tecnología en materia bélica, las armas y las municiones han seguido una trayectoria de desarrollo creciente, logrando mayores alcances y poder destructivo. Es por ello que también se hace necesaria la inversión en nuevas tecnologías de blindajes para aumentar la supervivencia frente a estas nuevas armas y amenazas.

## 2.2 Historia del blindaje en el ámbito naval

Los primeros barcos de guerra surgen con las civilizaciones de los babilonios y asirios alrededor del año 3000 a.C., pero no es hasta, aproximadamente, el año 1000 a.C. cuando los griegos comienzan a darle un mayor protagonismo para defenderse de las invasiones persas y más tarde con la época romana el tirreme romano también toma importancia para preservar los dominios de las aguas del Imperio Romano lejos de los ataques de piratas y sus enemigos cartagineses.

Estas naves eran construidas enteramente a base de madera, debido a que era el material estructural que mejor dotaba de ligereza y resistencia en aquellos tiempos. Únicamente algunas disponían de un refuerzo, hecho generalmente de bronce o hierro, en la punta de su espolón para causar más daños en los barcos enemigos (Figura 2-2).



Figura 2-2. Tirreme griego con espolón en proa [5]

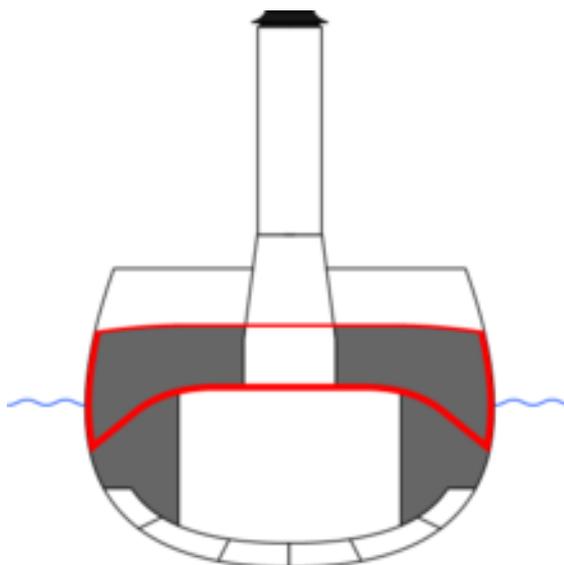
Durante la Edad Media surge la galera, que, aunque también siguen siendo construidas únicamente a partir de madera, algunas de estas naves eran equipadas con parapetos, paveses o escudos, que proporcionaban a sus tripulaciones de protección ante las flechas enemigas e incluso el fuego griego.

La llegada de la pólvora desembocó en el desarrollo de la artillería naval, que comprendió aproximadamente en el periodo que va desde 1650 a 1860 [4]. Esto trajo consigo una gran revolución en el cambio de pensamiento de las batallas y tácticas de guerra en la mar.

En estas batallas navales el mayor número de bajas se conseguía por acción de los cañones, pero sorprendentemente, no por acción directa de estos, sino por la lluvia de astillas y cascotes que generaban los proyectiles de los cañones al impactar contra la madera de las cubiertas y obra muerta del barco. Por ello se hizo fundamental aumentar la capacidad de supervivencia a bordo.

Con la incorporación del obús y la munición explosiva, comienza la introducción de metales, como el hierro y posteriormente el acero, a la construcción de barcos. Así aparecen los primeros buques de guerra blindados, llamados “Ironclads”, que fueron empleados a partir de 1860 y hasta 1890. Estos buques fueron ideados para minar la capacidad ofensiva de la nueva munición penetrante y explosiva y para evitar la creación y propagación de incendios a bordo durante el combate. El primer buque construido de este tipo fue el buque de la Armada Francesa “La Glorie” puesto en operatividad en 1860 [5].

Tras los Ironclads les suceden los Pre-dreadnoughts, los cuales fueron los primeros en denominarse buques acorazados. Los Pre-dreadnoughts aparecen entre 1890 y 1905. Estos eran barcos construidos en acero y su blindaje, formado a base de acero endurecido, no era unifrome, sino que era más grueso y robusto en las zonas críticas del barco. Poseían un cinturón blindado que protegía las secciones centrales del casco en donde se encontraban las calderas y máquinas, en los compartimentos bajo el agua utilizaban un doble fondo para evitar inundaciones por perforación del casco (Figura 2-3) y los compartimentos bajo la línea de flotación más cercanos al forro del casco eran destinados a a contener las carboneras o tanques de agua para calderas, lo cual ayudaba a amortiguar impactos. También se reforzaban las cubiertas con blindajes ligeros de acero de entre 50 y 100 mm para protegerse de bombardeos desde aeronaves cuando aparecieron estas.



**Figura 2-3. Esquema de la sección de un acorazado tipo pre-dreadnought. En rojo el cinturón blindado y se observa doble fondo en la parte inferior del casco. [6]**

Durante este periodo, este tipo de acorazados también fue experimentando una evolución en la calidad de los materiales de blindaje. En un primer momento, estos barcos eran rotegidos por un

blindaje compuesto de hierro forjado y acero. El acero mostraba gran resistencia frente a la penetración, pero se resquebrajaba fácilmente ante varios impactos. Hasta que H. A. Harvey introdujo una nueva forma de fabricación de blindajes en Estados Unidos al impregnar de carbono en una de las caras de las planchas de acero a alta temperatura y después sometiéndolas a un templado (Figura 2-4). Este nuevo método de fabricación supuso una enorme mejora en el acero de blindaje, aumentando su resistencia a la penetración en torno a un 20% con respecto al compuesto de hierro forjado y acero [7].

### Método Harvey para chapas de blindaje

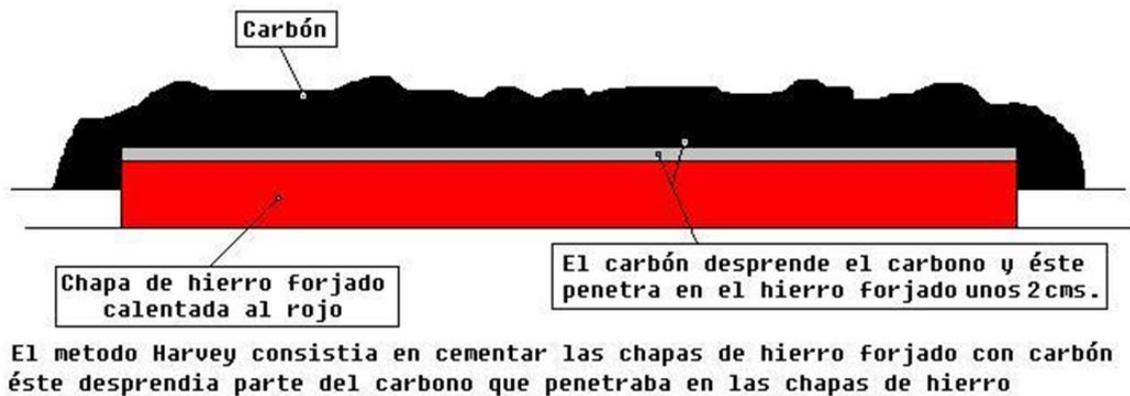


Figura 2-4. Método Harvey para acero reforzado [7]

De igual manera, en Alemania en 1893 la industria Krupp ideó otro método de forja para planchas de acero de blindaje, mediante la cual se le impregnaba al acero capas de níquel y cromo. La ventaja que proporcionaba Krupp era que permitía el endurecimiento del blindaje sin la adición de carbono mediante un método denominado decarburación o endurecimiento progresivo. Las superiores cualidades del blindaje de Krupp llegaron hasta el extremo que prácticamente se empleaba sólo este procedimiento, únicamente en Estados Unidos seguían utilizando el método Harvey. Fue comprobado que el blindaje Krupp superaba al Harvey en aproximadamente un 15% [7].

Estos avances en material supusieron mejores prestaciones para un cinturón blindado de menor peso.

La entrada en servicio del acorazado HMS Dreadnought de la Marina Real Británica en 1906 supuso un hito en la evolución de los buques de guerra. Este buque aportó dos características sobre las que se basaron posteriormente el resto de acorazados: un armamento mucho más potente y una propulsión a base de turbinas de vapor. Partir de este momento, los acorazados posteriores a este comenzaron a denominarse de tipo dreadnought y los anteriores, como ya hemos visto, pre-dreadnought.



**Figura 2-5. Acorazado Bismarck tipo dreadnought (1941) [8]**

El blindaje de los primeros dreadnoughts se basaba en un grueso cinturón blindado que rodeaba el barco alrededor de la línea de flotación. Estos cinturones eran de, aproximadamente, unos 280 mm de grosor. Al igual que en los pre-dreadnoughts, detrás del cinturón se alojaban las carboneras. Para el resto de secciones del barco que no formaban parte del reducto central también se aplicaba blindaje, pero bastante más ligero.

Con la aparición del proyectil perforante con capacete en 1900 y con el consiguiente avance de las armas, la coraza se ha encontrado en inferioridad frente al poder de fuego artillero y más después de la II Guerra Mundial con la incorporación de los misiles.

### **2.3 Protección balística en la actualidad**

Acualmente existen varias empresas e institutos de investigación cuyo cometido es innovar en I+D dentro del ámbito de protección balística y antifragmentos. Algunos ejemplos de empresas independientes son SSAB [9], MKU [10] o DuPont [11].

Con la proliferación de nuevas armas y municiones de mayor capacidad perforante, los materiales de protección se encuentran por el momento en desventaja frente a estas nuevas amenazas. Cabe destacar además que una de las principales armas con la que cuentan los buques en la actualidad y que se encuentra en un continuo desarrollo son los misiles, los cuales poseen gran capacidad incendiaria, explosiva y penetrante.

Por lo tanto, existen tipos de amenazas ante las cuales la ciencia y tecnología aún no han sido capaces de desarrollar ningún sistema de protección que pueda afrontar una defensa efectiva ante ellas, dentro de las restricciones propias al espesor del material para no comprometer el peso del buque.

Es por ello que, aunque el estudio de nuevos y mejores blindajes que soporten mejor los impactos de proyectiles sigue siendo crucial, el objetivo será siempre evitar que se produzca el impacto contra el buque. Para ello se han desarrollado técnicas que previenen que en un último momento se produzca el impacto, como los sistemas CWI, o en el caso de la protección balística, los sistemas de blindaje activo o ERA (“Explosive Reactive Armor”) [12] que montan algunas marinas de guerra como la francesa.

Este blindaje activo es un sistema de protección novedoso por el cual los paquetes de ERA o SLERA, que se instalan sobre la superficie del casco, cuando detectan un impacto eyectan en dirección opuesta al proyectil, la placa metálica que es eyectada bloquea o reduce la energía cinética de este y por lo tanto su poder destructivo.

Sin embargo, estos sistemas se vuelven ineficaces frente a proyectiles que alcancen altas energías cinéticas. Por ello estos sistemas no presentan más que un mero complemento a la protección balística, lo cual está contribuyendo al desarrollo de un nuevo concepto de blindajes compuesto que incluye distintas capas de distintos materiales cada uno con propiedades y funciones propias y específicas.

## **2.4 La amenaza actual**

En el medio marino pueden distinguirse dos grandes grupos bien diferenciados de posibles focos de riesgo y amenaza: por un lado, están los actos deliberados y de naturaleza delictiva y por el otro los accidentales, fruto de causas naturales [13].

Con respecto al primer grupo, se destacan las siguientes actividades debido a su potencial efecto sobre la Seguridad Nacional: tráfico ilícito, piratería, terrorismo, proliferación de armas de destrucción masiva, tráfico de ilícito de personas e inmigración irregular y los ciberataques.

También es interesante identificar los posibles factores causantes de tales amenazas. Entre estos factores, se contemplan generalmente la pobreza, desigualdad, extremismos y fanatismos ideológicos, desequilibrios demográficos y el uso con fines nocivos de las nuevas tecnologías como posibles potenciadores de las actividades criminales anteriormente citadas [13].

Vamos a definir más detalladamente algunas de las diferentes actividades ilícitas que se pueden llevar a cabo en la mar y que pueden tomar acción directa sobre nuestras unidades navales, para así obtener una idea general del tipo de amenazas al que nuestros buques pueden enfrentarse:

### *2.4.1 Terrorismo*

El terrorismo que se desarrolla por la vía marítima comprende diversas actividades como son el secuestro de buques de pasajeros, atentados contra buques de guerra o civiles y el empleo de pequeñas y rápidas embarcaciones que posibiliten la infiltración de fuerzas terroristas para posibilitar futuros atentados en tierra.

A todo esto, hay que sumar también la posibilidad que supone el operar en el medio marino de sufrir ataques suicidas como ya se ha reflejado en la historia en anteriores casos.

Bien es cierto que este tipo de actividades llevan tiempo sin ocurrirse, siendo los últimos atentados de esta índole los producidos por la banda terrorista ETA contra buques de la armada como el D-43 Marqués de la Ensenada en 1981, el P-28 Tabarca en el año 1982 y el último se produjo en 1984 contra la patrullera PVI-19, produciéndose en este último la muerte de un marinero [14].

Estos ataques se basaban enteramente en la colocación de bombas o explosivos caseros ocultos en partes externas del barco, pero muy cerca de las zonas vitales; o en atentados con pequeñas embarcaciones cargadas de explosivos, no tripuladas, dirigidas contra su objetivo. En ambos casos, el material de destrucción empleado eran explosivos de poco poder destructivo.

### *2.4.2 Piratería*

La piratería es hoy en día una de las mayores amenazas a la que los barcos de todo el mundo se enfrentan.

Este tipo de delitos han experimentado un auge en el número de sus actividades en las aguas internacionales en los últimos años, especialmente fue entre los años 2008 y 2012 cuando más se extendieron los ataques de este tipo sobretodo en las costas de Somalia y demás países del Cuerno de África. Durante ese tiempo, el Océano Índico era una zona de alto riesgo para los 20.000 barcos civiles

que cruzan cada año el mar Rojo y el golfo de Adén, ruta enormemente frecuentada por mercantes y cargueros.

En el año 2008 el número de ataques era de 134, entre ellos 40 eran secuestros [15]. Caben destacar los pesqueros españoles que fueron secuestrados, Playa de Bakio o el Alakrana en 2009. Según datos facilitados por el International Maritime Bureau, entre 2008 y 2012 se realizaron alrededor de 1900 ataques piratas y solo en 2012 se concentró el 50% de esa cifra [13]. Durante los primeros seis meses del 2013 el número de ataques registrados era de 138.

Por este motivo era de vital importancia garantizar el uso del mar lícitamente y de manera permanente además de disponer de las medidas de prevención y respuesta ante estos actos de piratería en las zonas de alto riesgo. Por solicitudes de Francia y España, a finales del año 2008, el Consejo de la Unión Europea puso en marcha la operación Atalanta de lucha contra la piratería [15].

El modus operandi de estos piratas suele ser el ataque desde un buque madre, que suele ser un barco de mediano porte y que no mantienen permanentemente, por parte de varias pequeñas embarcaciones o planeadoras con alta velocidad y manejo. Los atacantes a bordo de estas embarcaciones suelen ir armados con armas de pequeño calibre, no soliendo superar el calibre 7,62 mm.

### 2.4.3 Conclusiones sobre la amenaza

En base a estos tipos de ataques, la mejor denominación para el tipo de amenaza más probable a la que nuestras unidades en la mar se enfrentan es la “*amenaza asimétrica*”

La amenaza asimétrica se define como un tipo de guerra sucia, terrorismo o guerrilla, la cual se caracteriza por la utilización de medios no convencionales y su mayor arma es la sorpresa y la dificultad para prever ataques y objetivos [16].

Como se ha dicho antes, las armas que emplean no suelen ser de gran porte, sin embargo, su impredecibilidad hace que se vuelvan altamente peligrosas. Estas armas suelen ser explosivos, caseros o no, de poco poder destructivo; fusiles y subfusiles de pequeño calibre; rifles de asalto de calibres entre 5,56 y 7,62 mm; ametralladoras, granadas y lanzagranadas como los RPG-7 [17].

Aun así, como ya se ha dicho antes, la definición de amenaza asimétrica implica que no siempre se va a disponer de toda la información deseada para hacer una valoración sobre la amenaza. Siendo uno de los principales factores la carencia de datos sobre los medios de los que dispone la amenaza. Hoy por hoy la experiencia nos muestra que las armas principalmente empleadas por la amenaza a la que nos enfrentamos en la actualidad son las mencionadas anteriormente. Sin embargo, nada hace descartar que en un futuro estas amenazas sean capaces de incorporar a sus fuerzas de armas más potentes.

## 2.5 Tipos de materiales

La ciencia de los materiales clasifica a todos estos según las diferentes propiedades que presentan y su estructura molecular. En base a esta clasificación podemos distinguir de forma básica las siguientes familias: metales, cerámicas, polímeros y composites [18].

### 2.5.1 Metales

Los metales forman el grupo de materiales más empleados y adecuados para la construcción de máquinas. Debido a su compacta estructura molecular, poseen capacidades de rigidez y resistencia mecánica elevadas [18]. Siguiendo en el tema de sus características, son materiales bastante dúctiles y

maleables, lo cual permite gran facilidad en su conformado y sobretodo, presentan un gran grado de deformación antes de producirse la ruptura, lo cual les aporta una gran ventaja en cuanto a la absorción de impactos y la atenuación de la energía que el objeto de impacto pueda transmitir al material.

Además, las propiedades anteriormente mencionadas tienen la posibilidad de ser modificadas y mejoradas por medio de procesos de deformación plástica en frío o tratamientos térmicos y la adición de aditivos, tal como hemos visto previamente en Figura 2-4.

Por otro lado, presentan el inconveniente de tener una estabilidad química baja, lo que implica que son sensibles a la corrosión. Esto provoca que algunas de sus propiedades como la tenacidad o la dureza disminuyan progresivamente, a no ser que sean tratados adecuadamente para prevenirla. Lo cual conlleva a tener que efectuar sobre ellos tratamientos para protegerlos de dicha corrosión y oxidación y también a realizar acciones de mantenimiento preventivo y predictivo [18].

Otro inconveniente es que por lo general son de elevado peso, aunque a continuación veremos que dependiendo del tipo de metal esto puede variar.

Los materiales metálicos que son más empleados en el diseño de máquinas y estructuras son los siguientes [18]:

- Materiales férricos (Fe). Se tratan en su mayoría de aceros y fundiciones. Poseen muy buenas propiedades mecánicas, aunque son de elevada densidad y bastante propensos a sufrir corrosión. Existe la variante de los aceros inoxidable, que resisten mejor la corrosión, pero conlleva un mayor coste.
- Aleaciones de aluminio (Al). Son metales bastante más ligeros y son buenos resistentes a la corrosión, sin embargo, su precio es más elevado.
- Aleaciones de cobre (Cu). Son muy buenos conductores de electricidad y resistentes a la corrosión. Su desventaja es que son muy densos y caros.
- En menor medida encontraremos otros tipos de aleaciones, como aleaciones de zinc, muy maleables y dúctiles; de magnesio; y de titanio, muy duros y de baja densidad y resistente a la corrosión.

### *2.5.2 Polímeros*

Los polímeros se basan en estructuras de macromoléculas orgánicas a los que se les puede añadir aditivos, de esta manera se puede diferenciar entre polímeros naturales (celulosa, seda, etc.), polímeros artificiales y polímeros sintéticos (aramida, polietileno, etc.) con la incorporación de varios tipos de aditivos. A diferencia de los metales, estas estructuras moleculares no son tan compactas y, por lo tanto, su densidad es baja, al igual que su resistencia mecánica y su rigidez. Así mismo, por lo general poseen una buena ductilidad.

Para la obtención de más propiedades mecánicas, estos por lo general han de ser modificados mediante la variación de su composición. Entre ellas, las propiedades mecánicas más buscadas para los polímeros son la dureza, fragilidad, elasticidad y maleabilidad; también se suelen desarrollar polímeros que sean buenos aislantes térmicos y eléctricos.

Debido a esta flexibilidad que presentan en el número y tipo de propiedades que pueden adquirir, sus aplicaciones son numerosas y muy diversas. Entre ellas, se utilizan para la formación de revestimientos, materiales estructurales, materiales de ingeniería, etc. [19]

### *2.5.3 Materiales cerámicos*

Estos materiales inorgánicos y de tipo pétreo forman estructuras moleculares medianamente compactas, teniendo una densidad baja, especialmente si se les compara con los materiales metálicos.

A su vez, muestran una rigidez muy elevada, dependiendo del grado de cristalinidad de su estructura, a la vez que una gran resistencia a la compresión y un módulo elástico elevado. Otra de sus principales características es su capacidad para operar en temperaturas muy elevadas [1].

El principal problema de esta familia de materiales es que presentan una reducida resistencia a la tracción y flexión. Son materiales frágiles, de ductilidad casi nula, lo cual conlleva una tenacidad de fractura muy baja [1].

Hay una variante de estos materiales más avanzada a la que se denomina cerámicos tenaces que hace cierta mejoría en cuanto a su tenacidad de fractura, pero aun así sigue siendo baja.

Aun así, el resto de las características citadas han permitido que los materiales cerámicos y sobretodo los cerámicos avanzados, hayan podido ser de gran utilidad para multitud de aplicaciones industriales. Aplicaciones en diversos ámbitos de ingeniería como en la fabricación de turbinas y motores, aparatos de mecanización y en general todo tipo de aplicaciones que impliquen el empleo de materiales con alto módulo elástico y resistencia al desgaste [1].

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 2-1) pueden verse distintas aplicaciones y las ventajas que otorgan:

<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Material</b>
Motores diésel ligeros	Reducción 15% en consumo	Zirconios, Nitruros de silicio, Carburos de silicio, Alúminas, Titanatos de aluminio
Motores diésel pesados	Reducción 22% en consumo	Zirconitas, Nitruros de silicio, Carburos de silicio, Alúminas, Titanatos de aluminio
Turbinas de gas para automóviles	Reducción 27% en consumo	Nitruros de silicio, Carburos de silicio
Matrices de extrusión para latón	220% aumento en productividad	Nitruros de silicio (Sialones)
Mecanizado fundición gris	200% aumento en productividad	Zirconios

**Tabla 2-1. Ventajas de los materiales cerámicos en aplicaciones industriales y estructurales [1]**

### 2.5.4 Materiales compuestos

También conocidos como *composites*. Los composites resultan de la unión de dos o más materiales de características distintas. El primero de los materiales es denominado como la matriz, que suele ser de carácter dúctil y maleable. El resto de materiales son conocidos como el refuerzo, que son añadidos bien en forma de partículas o de fibras. El refuerzo suele ser más resistente que la matriz, pero también suele ser más frágil, este es el encargado de proporcionar al composite la resistencia y dureza necesarias para la aplicación para la que haya sido encomendado.

De manera que la unión de dichos materiales mediante refuerzo y matriz resulta en un material compuesto con propiedades que los materiales que lo componen no podrían adquirir por separado. La matriz otorga al material cohesión, ductilidad y capacidad de moldeo y la tenacidad, mientras que el refuerzo le proporciona resistencia a impacto, tracción y desgaste.

Tradicionalmente los composites se clasifican atendiendo al tipo de matriz que les constituye, así encontramos los composites de matriz polimérica, los de matriz metálica y los de matriz cerámica.

- En los composites con matriz polimérica encontramos los llamados polímeros reforzados. Generalmente su refuerzo es a base de fibras, por ello estos materiales también son denominados FRP que son las siglas de “Fibre Reinforced Polymers” [1].
- En menor medida tenemos los composites de matriz metálica, reforzados con fibras y denominados “Fibre Reinforced Metals” o FRM [1].
- Los menos populares por el momento son los composites de matriz cerámica, los “Fibre Reinforced Ceramics” o FRC [1]. Estos materiales son generalmente reforzados con fibras también cerámicas, lo cual les otorga unas muy altas prestaciones, en detrimento de también un alto coste.

## 2.6 Métodos de decisión multicriterio

La necesidad de estos métodos es realizar de soporte para la toma de decisiones. Según estudios psicológicos redactados entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se concluía que la mente humana está muy bien diseñada para realizar comparaciones por pares, entre dos alternativas, pero cuando el número de alternativas aumenta, la mente humana tiende a perder efectividad en cuanto a la toma de una alternativa.

Los métodos de decisión multicriterio, conocidos por las siglas MCDM, tratan de paliar estas deficiencias en la mente humana para optimizar el proceso de la toma de decisiones en el contexto de distintas variables en conflicto.

Los MCDM surgen de motivaciones económicas y empresariales en las que la toma de decisiones para futuras inversiones era un ejercicio totalmente cotidiano. La aparición de estas técnicas fue posible por medio de los trabajos que se realizaron por diversos investigadores en el siglo XIX en materia de ciencia económica [20]. La metodología en la que se sustentan estas técnicas fue desarrollada durante el siglo XX y el primer método de decisión multicriterio discreto surge en 1968 por Charnes y Cooper, desarrollando el método ELECTRE [20]. A partir de esa fecha y con especial importancia en las décadas de los 70 y 80, se han desarrollado multitud de técnicas MCDM para cubrir o satisfacer los distintos campos de incertidumbre en los que se pueda estar inmerso a la hora de la toma de decisiones.

Existen dos tipos de MCDM: los métodos discretos y los continuos. Los métodos continuos son diseñados para afrontar problemas en los que puede haber diversas soluciones factibles formadas por infinitos puntos [20]. Por su parte, los métodos discretos están enfocados a la resolución de problemas donde el número de alternativas expuestas es finito y generalmente no muy grande [20]. También encontramos un tercer tipo, el cual no es excluyente para pertenecer también al método discreto o

continuo, este tercer método es el de ponderación de variables o determinación de pesos, en el que a cada alternativa se le da un porcentaje de idoneidad tras haber realizado un proceso matemático para cuantificarlo.

Emplearemos una técnica de decisión denominada el método AHP (“*Analytic Hierarchy Process*”) que nos ayudará a escoger la opción más eficaz. Este método AHP está contrastado empíricamente en diversas aplicaciones, como en la localización y asignación de recursos, producción, evaluación de sistemas, resolución de conflictos internacionales ó elección de nuevas tecnologías entre otras. No obstante, más adelante veremos cómo el método AHP también puede ser de utilidad para labores operativas, además de logísticas, en las Fuerzas Armadas.

### 2.6.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Obra del Profesor Thomas L. Saaty (1980) [20]. Esta técnica surge curiosamente como respuesta a varios problemas que se estaban dando en esa época en cuanto a la toma de decisiones en el Departamento de Defensa de los EEUU. En la actualidad este proceso es muy popular en el mundo empresarial, siendo aplicado en la mayoría de casos en los que es preciso tomar una decisión que conlleve complejidad.

El AHP se sustenta en una serie de fundamentos psicológicos y matemáticos, asimismo, ya hemos visto que también tiene su fundamento empírico en las diversas aplicaciones en las que ha sido empleado.

Los fundamentos psicológicos recogidos para este proceso se basan en la dificultad en la toma de decisiones en la mente humana mediante comparaciones globales. Por ello el Profesor Saaty planteó una escala de comparaciones pareadas en la cual se le otorga una ponderación a un elemento en base a su importancia frente a otro elemento. Esta escala (Tabla 2-2) es la que hace posible la realización de comparaciones pareadas entre elementos.

Valor	Definición	Comentario
1	Igual importancia	Los dos criterios contribuyen de igual forma
3	Importancia moderada	El criterio A es ligeramente más favorable que el B
5	Importancia grande	El criterio A es fuertemente favorable frente al B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	El criterio A es absolutamente más importante que el B

Tabla 2-2. Escala Saaty de comparaciones pareadas [20].

De igual forma, para expresar la importancia de un criterio frente a otro de forma inversa, la escala Saaty contempla darle el valor inverso al criterio (Tabla 2-3).

Valor	Definición	Comentario
1/5	Desventaja grande	El criterio A es fuertemente inferior al criterio B

Tabla 2-3. Ejemplo de valoración negativa. Confección propia.

En cuanto a la robustez matemática, los elementos que se utilizan en el proceso, fundamentalmente matrices, han de contener una serie de características para demostrar su integridad. Estas características son las siguientes: reciprocidad, homogeneidad y consistencia.

La especialidad del AHP es su flexibilidad para ser integrado en diferentes técnicas. Esto permite al usuario a extraer beneficios de todos los métodos combinados y consecuentemente a alcanzar la solución óptima [21]. Asimismo, el cálculo y la realización de los métodos matemáticos es bastante sencillo. En definitiva, el AHP se define como un método de selección de distintas alternativas en función de una serie de variables. Para ello, mediante los cálculos matriciales se realiza una ponderación tanto de las variables como de las alternativas y de esa forma se realiza un orden de idoneidad de las alternativas expuestas.

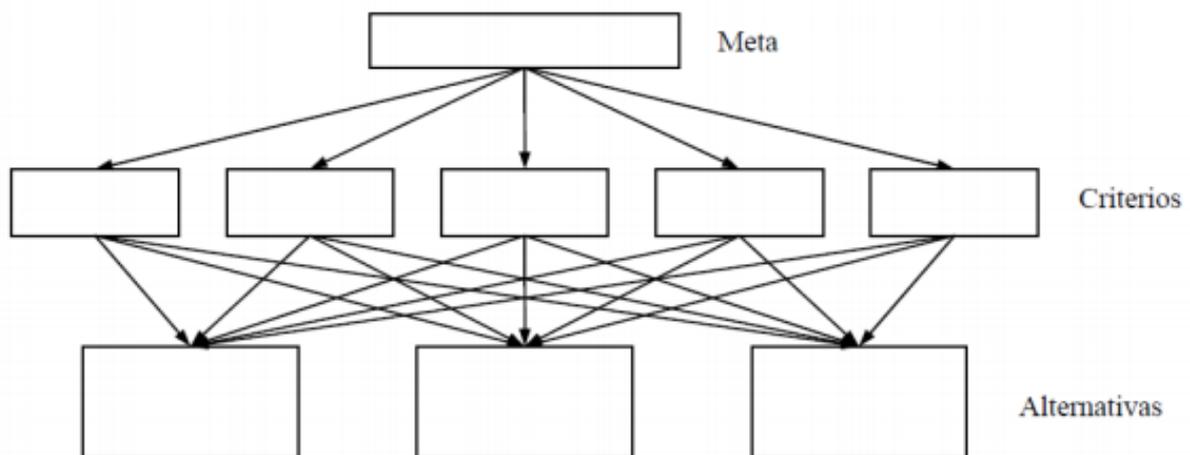


Figura 2-6. Figura explicativa de la estructura jerarquizada en el método AHP [22].

### 2.6.1.1 Aplicaciones de interés para la Armada

Son muy diversas las aplicaciones en las que se puede emplear este método en la Armada, siendo desde aplicaciones operativas hasta logísticas. Para ello, el Grupo de Investigación Militar Operativa, GIMO, desarrolló varios ejemplos:

- Predicción de rutas de escape. Sabiendo una posición reciente de la unidad y conociendo su destino, se puede hacer una predicción de las posibles rutas más óptimas que se puedan tomar en base a distintos criterios como la autonomía, velocidad, presencia de otras unidades, y demás criterios. Obviamente, este tipo de aplicaciones se basan en predicciones y suposiciones, pero puede ser de utilidad a la hora de dar una aproximación en los hechos futuros.
- Predicción de las posibles acciones de una amenaza. Si se conocen los medios de los que dispone y el eje de la amenaza, se puede averiguar cual es la línea de acción más probable. En relación a distintos criterios como el número de unidades, sus armas y objetivos, entre otros, el AHP puede dar una aproximación, de manera que dispongamos de la antelación suficiente para estar preparados.

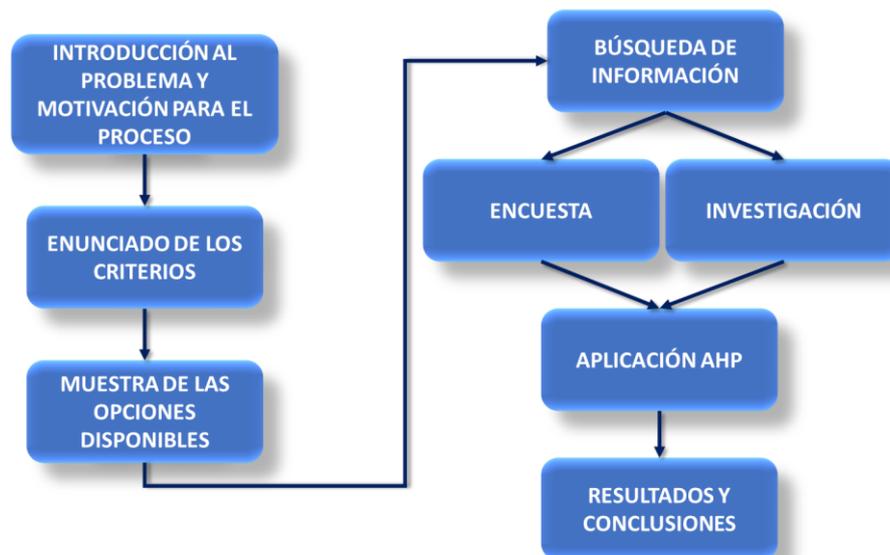
## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Introducción a la metodología

Sobra volver a comentar que el método científico que se decidió utilizar para llegar a la toma de resultados y conclusiones es el AHP, herramienta por la cual se hace una valoración matemática y con fundamentos psicológicos sobre la decisión más idónea. Pero para llegar a plantear esta técnica, es necesario asentar previamente una serie de conocimientos atendiendo al tipo de variables a utilizar y la forma de obtención de la información que se ha empleado.

Una vez delimitado el problema, queda desarrollar las variables de las que dependen las decisiones que se vayan a tomar con respecto al método de decisión planteado, las cuales no son más que los criterios y las posibles alternativas que se van a estudiar en el proceso AHP.

Con todo, se realizará una exposición de estas variables y criterios sobre los que se harán síntesis, de manera que dispondremos de toda la información posible para hacer un análisis crítico de estos diversos factores y facilitar su estudio e implantación en el método. Así mismo, también se obtendrá información por medio de una encuesta que se confeccionó y envió a personal tanto militar como civil, en dicha encuesta se preguntaba acerca de qué propiedades o qué materiales opina el encuestado que son de mejor aplicación en el ámbito de la protección balística aplicada a buques de guerra. El estudio de las respuestas de dicha encuesta será de ayuda para obtener una visión en la valoración de las variables planteadas.



**Figura 3-1. Proceso de realización del trabajo. Elaboración propia.**

Este proceso de obtención de información es crucial para el desarrollo del método AHP y el posterior análisis de los resultados obtenidos.

A modo de resumen, en la Figura 3-1 se detalla un esquema sobre el trabajo realizado para la elaboración de este proyecto.

En los próximos apartados se procede a hacer una explicación de la metodología empleada en cada uno de los distintos procesos desarrollados y sean de una relevancia importante para la elaboración del TFG.

### 3.2 Estructura del problema

Como ya se ha dicho, el objetivo perseguido es la obtención del material más adecuado para la tarea de protección balística. En el método que se va a emplear, comúnmente se realiza un esquema para mostrar la estructura del problema (Figura 2-6). Dicho esquema se puede hacer una diferenciación por niveles de los factores presentes para la realización del proceso (objetivo, medios y criterios) y sus relaciones.

La cantidad de niveles no tiene por qué ser fija. El número mínimo es de tres niveles, pero puede ser ampliado sin problema. Cuantos más niveles, más complejo será el método de elección, pero más preciso y verídico.

La confección de estas estructuras es útil a la hora de realizar una jerarquización en la que se vea claramente que los elementos pertenecientes a un nivel concreto son independientes tanto de los factores de niveles inferiores como de los factores del mismo nivel.

La jerarquía de los niveles suele atender de la siguiente manera:

- El nivel más alto atiende al nivel superior, el cual corresponde al objetivo que se quiere cumplir con la resolución del problema.
- Los siguientes niveles hacen referencia a los distintos criterios que se plantean en el problema. Lo más sencillo es que solo haya un nivel en relación a los criterios, pero pueden existir varios niveles de este rango con criterios y subcriterios.

- El último nivel es donde se encuentran las diferentes opciones que hemos considerado para la resolución.

### 3.3 Criterios seleccionados

Se han seleccionado cuatro criterios a tener en cuenta, estos suponen las características bajo las que se van a evaluar las distintas alternativas que hemos planteado. Estos criterios son: el coste, el peso, la resistencia estructural y la calidad balística.

Recapitulando, bajo estas cuatro características se va a basar nuestra elección de uno de los cuatro tipos de materiales que se enunciaron. A modo explicativo se ha realizado un diagrama siguiendo la estructura típica de la ejecución de un análisis AHP (Figura 3-2).

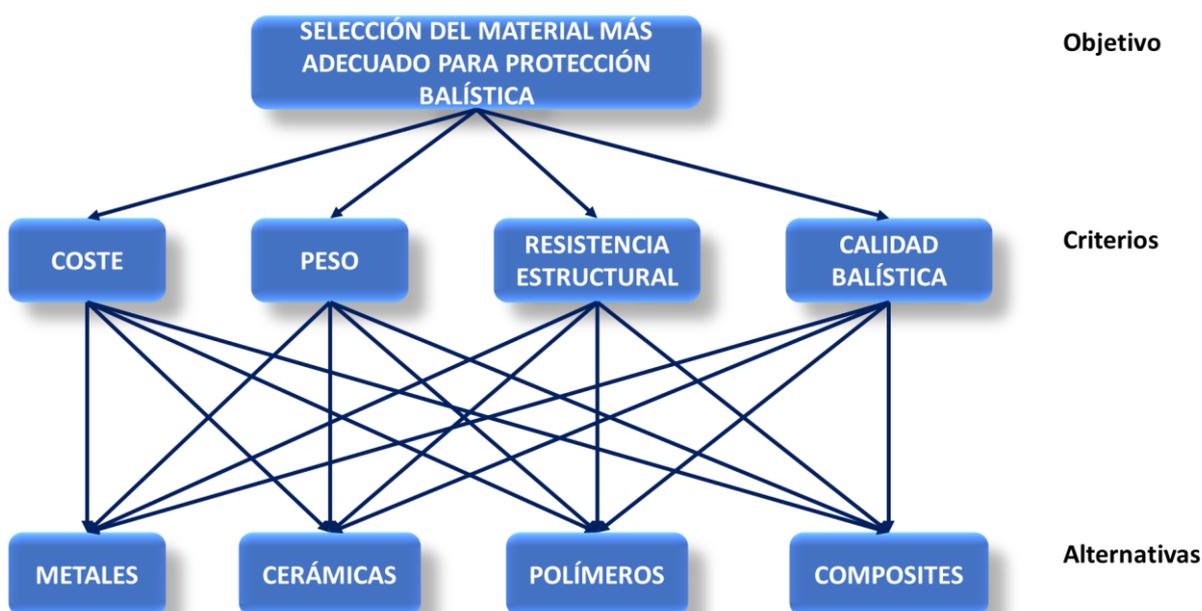


Figura 3-2. Diagrama estructura del problema. Confección propia.

El coste, el peso y la resistencia estructural son tres de las características más comunes que se suelen tener en cuenta para comparar materiales de construcción, en este caso se trata de construcción de barcos. En el momento de hacer una valoración de un material frente a otro en este ámbito, estos serán los criterios sobre los que serán analizados.

La cuarta característica, la calidad balística, es la más novedosa. Para poder realizar un estudio de los materiales para la protección era necesario introducir un criterio que permitiera cuantificar sus capacidades en este tema. Este criterio se centra en las aptitudes que muestre el material en respuesta ante un impacto por proyectil.

En este apartado se dispone a hacer una exposición y una breve explicación de cada uno de los criterios que han sido seleccionados para tener en cuenta, de manera que el lector se habitue con estos criterios, en caso de que aún no lo esté.

- Coste. La estimación del coste para seleccionar el material con el que se va a construir el casco de un barco es fundamental para un primer estudio de la viabilidad. No solo eso, sino que el coste no influye únicamente en el momento de construcción, sino que hay que tener

en cuenta el costo de los futuros mantenimientos y/o reparaciones, por lo que un material más caro a la larga puede resultar más barato.

- **Peso.** Esta propiedad se trata de una característica muy importante, ya que rige dos factores que son de extrema relevancia en los barcos. Por un lado, interviene directamente en el nivel de consumo de los motores del buque. Por el otro, es de elevada influencia en cuanto a la estabilidad del barco. Por lo tanto, lo más óptimo es, al igual que ocurre con el coste, elegir la alternativa que menor peso tenga.
- **Resistencia estructural.** Viene indicada en relación a otras propiedades, como son la tensión nominal, deformación nominal ó el módulo de elasticidad. Es uno de los datos más determinantes es el límite de elasticidad del material, el cual nos indica el punto máximo a partir del cual el material después de sufrir un esfuerzo ya teóricamente debería quedar inservible. Sin embargo, esta propiedad solo es de aplicación para materiales dúctiles o plásticos. En el caso de las cerámicas, se utilizará el límite de rotura, ya que se tratan de materiales muy rígidos con inapreciable capacidad de deformación.
- **Calidad balística.** Este factor será necesario cuantificarlo mediante experimentos balísticos ya existentes sobre las distintas alternativas que se estudien y en función de los resultados, darles un valor de comparación. Sin embargo, este tipo de información en las diversas fuentes de datos es más bien escaso en algunas de las opciones propuestas. Además, el impacto depende de otros factores como el ángulo de incidencia, por lo tanto, esta característica es de una mayor dificultad y subjetividad si se realizase en base a estudios previos sobre impactos. Por ello, se ha decidido que sea la dureza del material y la capacidad de absorción de la energía de impacto dos de las características que nos puedan ayudar a determinar y ponderar la resistencia al impacto del material.

Para realizar la ponderación de los materiales en función de estos criterios se realizará un estudio contando con la información que se ha podido encontrar sobre estos temas.

### **3.4 Materiales y alternativas de aplicación en protección balística**

Anteriormente se realizó una numeración y breve explicación de todas las distintas familias de los materiales. Se han tenido en cuenta todas ellas debido a que diversos estudios e investigaciones que han demostrado las capacidades y aplicaciones que tienen multitud de materiales de muy distintas características y clasificaciones en el ámbito de la protección balística.

Los cuatro tipos de materiales que a continuación se van a definir corresponden a las cuatro alternativas que se tendrán en cuenta para la realización del método AHP.

#### *3.4.1 Metales en protección balística*

Este grupo de materiales corresponde al más empleado a día de hoy en la protección balística. Siendo el acero de blindaje su mayor representante debido a su excelente relación calidad/precio. En menor medida también se pueden encontrar otros materiales metálicos como los aluminios, que empiezan a acrotar distancia frente al acero. Ya en mucha menor medida aún se encuentran aleaciones de magnesio y de titanio.

##### **3.4.1.1 Aceros**

El mayor punto negativo a tener en cuenta es la elevada densidad del acero para blindajes ( $7.85 \text{ g/cm}^3$ ) [1]. Como ventajas encontramos su maleabilidad, lo que le permita adaptarse a diversas formas; además son materiales soldables y resiste bien impactos múltiples.

El acero de blindaje común muestra una tensión de rotura alrededor de 1500 MPa y dureza Brinell de 500 aproximadamente, depende del tipo de acero que se esté empleando. Debido a estas excelentes

cualidades, muchas empresas dedicadas a la protección antibalas comercializan con este metal. En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 3-1) se ven las especificaciones y aplicaciones que recomienda la empresa de construcción de aceros de protección Creusot Loire:

Protección	Nomenclatura	Dureza	Aplicaciones
Armaduras homogéneas de acero laminado	MARS 380	≤ 400	Estructuras de vehículos Cosntrucción de buques y fragatas Puestos de observación
		400-480	Protección contra explosiones Bajos de vehículos
Armaduras de acero de durezas media-alta	MARS 440	477-534	Estructuras de vehículos ligeros y medios Accesorios de protección antibalas y suplementos para armaduras Furgonetas de seguridad
		578-655	Construcción de puerts y ventanas Armaduras pesadas Accesorios de protección antibalas
Armadura de acero de alta dureza	MARS 500		
Armaduras de acero de muy alta dureza	MARS 600		

**Tabla 3-1. Ejemplos de aceros comerciales tipo MARS [23].**

En la tabla anterior se nos mostraba el dato de la dureza para cada tipo de gama de acero. En la tabla que a continuación se presenta (Tabla 3-2), representa la correlación que tiene la dureza del material con su resistencia balística:

Acero	Límite elástico (MPa)	Dureza BHN	Espesor recomendado (mm)
Ramor 400	1100	360-450	13,4
Ramor 450	1100	420-480	13,1
Ramor 500	1450	480-560	12,7
Ramor 550	1550	540-600	12,2

**Tabla 3-2. Límite balístico de aceros Armox con impacto de proyectil 7.62 x 39 mm AK-47 a 30 metros [24].**

Como podemos ver en las tablas anteriores el valor de la dureza llega hasta aceros de muy alta dureza, sin embargo, en los últimos años está comenzando a surgir el acero de dureza ultra alta (UHH), los cuales sobrepasan los 600 BHN. Estos aceros son capaces de igualarse a la capacidad antipenetrante de los materiales cerámicos avanzados que se comentarán más adelante.

### 3.4.1.2 Aluminios

El aluminio para protección está experimentando un impulso tecnológico, encontrándose en el segundo lugar de los materiales metálicos más utilizados para la protección balística.

La mayor ventaja frente a su principal competidor, el acero, es su mucha menor densidad ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ) [1]. Por otro lado, este tipo de aleaciones no alcanzan a obtener las mismas cualidades y propiedades mecánicas que las del acero. En la Tabla 3-3 se puede ver comparadas las propiedades balísticas del acero y el aluminio para un mismo tipo de proyectil e impacto.

<b>Material</b>	<b>Espesor mm</b>	<b>V<sub>50</sub> m/s</b>
Acero Armox 600 T	4,52	723
	5,46	760
	6,32	782
Acero Armox Advance	4,52	667
	5,38	819
	6,40	859
Aluminio 5059	1,8	428
	13,3	444
	14,9	482
Aluminio 5059-H131	25,1	578
	26,3	600
	30,4	650

**Tabla 3-3. Comparación impacto por proyectil 7,62 APM2 30°. Confección propia, datos obtenidos de [1].**

El término  $V_{50}$  que vemos en la Tabla 3-3 hace referencia a una medida para cuantificar la capacidad de soportar impactos. Se define como la velocidad a la que hay un 50% de probabilidades de parada para un proyectil impactado [25]. Cuanto mayor sea este valor, significará que podrá soportar una mayor velocidad y energía de impacto.

Aunque cabe destacar que, como se ha dicho antes, están en un intenso proceso de investigación, habiéndose conseguido en los últimos diez años mejorar sus propiedades cuantiosamente [1]. Por ello no sería de extrañar que en un futuro sus propiedades mecánicas y balísticas sean mucho más próximas a las del acero.

Por el momento, teniendo en cuenta sus menores prestaciones y su mayor coste, las aplicaciones para las que se encomiendan los aluminios suelen ser en ámbitos donde el peso juega un papel crucial en la confección del blindaje.

Un dato curioso sobre el aluminio y su relación con la protección balística es que una de las aleaciones más utilizadas es la 5083-H131 [1], la cual es empleada en la fabricación de los cascos de los vehículos ligeros de combate M113 y M109.

Otra nueva aplicación, recientemente desarrollada en la Universidad Pontificia de Cartagena (UPV) en el aluminio es la espuma de aluminio (Figura 3-3). La espuma de aluminio es un material poroso muy eficaz para aplicaciones de aislamiento sonoro, electromagnético y en la absorción de energías de impacto [26]. Este compuesto ofrece nuevas propiedades físicas y mecánicas muy satisfactorias, las cuales les hace propicios para aplicaciones en el sector de la automoción, aeroespacial, o naval entre otros. Otra interesante característica es que, gracias a su alta porosidad, su densidad es muy baja, siendo entre  $0,4$  y  $0,8 \text{ g/cm}^3$  [26], lo cual le proporciona la flotabilidad positiva.

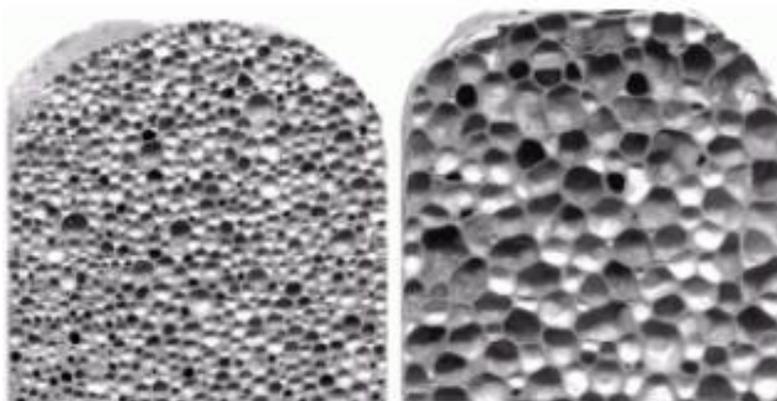


Figura 3-3. Dos muestras de espumas de aluminio [26].

### 3.4.1.3 Otras aleaciones

El resto de aleaciones de protección representan un porcentaje de empleo bastante más bajo que el de los dos anteriores de forma individual. En este grupo se engloban, sobretodo, aleaciones de titanio y magnesio.

El titanio es un material con una densidad bastante más baja que la del acero,  $4,51 \text{ g/cm}^3$  [1], en cuanto a sus características mecánicas, son bastante prometedoras. Por lo que se trata de una alternativa que puede mostrar una buena perspectiva en el ámbito que se desarrolla en este TFG. Por otro lado, hay muchos menos estudios sobre el titanio en esta materia, mayormente debido a su más elevado coste en comparación con otras aleaciones.

La aleación de titanio que más empleo tiene en este aspecto (y podría decirse que la única) es la Ti6Al4V. Un estudio llevado a cabo sobre este material realizó una comparativa entre esta aleación y otras aleaciones de acero de blindaje. Aunque en las pruebas realizadas el espesor de la plancha de titanio era mayor, debido a su baja densidad el peso de las planchas era prácticamente idénticas a las del acero. Los resultados del experimento se muestran en la Tabla 3-4.

Material	V. de impácto	V. residual
	m/s	m/s
44,64 mm acero RHA	1507	1297
	1510	1297
40 mm acero RHA	1973	1893
	1997	-
70,21 mm Ti6Al4V	1500	1100
	1500	1118
	1989	1770
	1980	1831

Tabla 3-4. Ensayos balísticos sobre aleaciones de titanio y acero [1].

Como se puede ver, el titanio ofrece una leve mejoría en cuanto a capacidades de protección y de peso, no es así en cambio en términos de espesores. De cualquier forma, el problema del coste sigue

ahí y es también de una gran importancia. de hecho, no hay ninguna información pública que date el empleo del titanio para blindaje, aunque los datos sobre blindajes en vehículos suele ser un tema muy confidencial.

El magnesio por su parte, presenta una densidad aun menor que el aluminio,  $1,74 \text{ g/cm}^3$  [1], lo cual ha conducido a que en algunos sectores de seguridad ya se esté implantando en sustitución del aluminio.

La aleación de magnesio que más se está empleando en la fabricación de blindajes muy ligeros es la AZ31B. Al igual que con el titanio, se han realizado ensayos balísticos con esta aleación y comparándola con otra aleación de acero y otra del aluminio AA5083 para hacer una confrontación con sus características (Tabla 3-5).

Material	Espesor	V <sub>50</sub>
	Mm	m/s
Acero RHA	1,78	366
Aluminio AA5083	8,18	396
Magnesio AZ31B	7,75	421

**Tabla 3-5. Comparativa de Magnesio con otras aleaciones [1].**

#### **3.4.1.4 Análisis de metales**

En vista a todos los estudios y experimentos balísticos que se han comentado, se muestra a continuación la Tabla 3-6, donde se observan las comparativas de todos los materiales anteriormente mencionados, a excepción del titanio, del que como previamente se dijo, se disponen de muy pocos estudios relacionados con este tema.

Aleación	Proyectil	Espesor mm	V <sub>50</sub> m/s
Acero RHA	5,56	1,78	366
Aluminio AA5083	5,56	5,18	396
Magnesio AZ31B	5,56	7,75	421
Acero RHA	7,62	7,11	524
Aluminio AA5083	7,62	21,03	506
Magnesio AZ31B	7,62	31,5	511
Acero RHA	12,70	7,11	718
Aluminio AA5083	12,70	21,03	663
Magnesio AZ31B	12,70	31,5	639
Acero RHA	20mm	17,22	878
Aluminio AA5083	20mm	50,93	1125
Magnesio AZ31B	20mm	76,48	897

**Tabla 3-6. Resultados globales de pruebas balísticas [1].**

En base a estos resultados, se pueden realizar conclusiones por medio de la comparación de estos tres materiales. Es interesante notar que, en términos generales, el comportamiento de estos tres materiales suele ser similar. Dependiendo del proyectil en concreto, el material idóneo varía, siendo la mejor opción para calibre 5,56 el magnesio, para calibres 7,62 y 12,7 es el acero y para mayores calibres el aluminio es el claro vencedor.

En base al estudio de la amenaza, el tipo de material a emplear podría variar. Si nos centramos en la amenaza actual que ha sido descrita en un apartado anterior, las municiones utilizadas son de calibres hasta 7,62 normalmente. Por lo que lo lógico sería utilizar aleaciones de magnesio y acero, aunque las aleaciones de aluminio conviene no olvidarlas, debido a la variabilidad de medios y el factor sorpresa del que presume la amenaza marítima de nuestros días.

### 3.4.2 Cerámicas en protección balística

Tradicionalmente los materiales cerámicos se dedican a labores de construcción o de la industria. En nuestro tiempo se encuentran también otros materiales cerámicos como los óxidos, carburos, nitruros, boruros y otros compuestos [27].

Estos últimos tipos de cerámicos enunciados corresponden a los nuevos materiales cerámicos avanzados. Este término de avanzados corresponde a una nueva generación de cerámicas cuyas nuevas capacidades han sido mejoradas enormemente. Los materiales cerámicos avanzados se forman a través de la modificación de la estructura del material.

Una de las mayores ventajas de estos materiales es su gran reducción de peso frente a otros materiales como los metales. Entre las diferentes aplicaciones que se les han dado a los cerámicos avanzados, el uso de interés en este trabajo es su empleo para protección frente a impactos balísticos. De este modo se han desarrollado cerámicas como las alúminas de distintas purezas, carburos de silicio, de boro, diboruro de titanio o nitruro de aluminio entre otros [27].

Las ventajas que aportan estos materiales en el ámbito balístico son muy diversas, en gran parte gracias a su extremada dureza, resistencia y módulo elástico y su baja densidad. Uno de los aspectos claves es el peso, en este caso el factor del peso se consiguió rebajar considerablemente, gracias a sus excelentes propiedades específicas y por ello su eficiente calidad balística.

Es por ello que las principales características de estos materiales en la protección son su baja densidad y su gran eficiencia balística. Siendo esta mayor que los materiales normalmente empleados para estos usos como el acero y el aluminio de alta resistencia. Por el contrario, su nivel de fragilidad no permite que sean usados en labores estructurales por el momento, sino que se traten de elementos añadidos que aporten una reducción en la estructura y unas mayores capacidades.

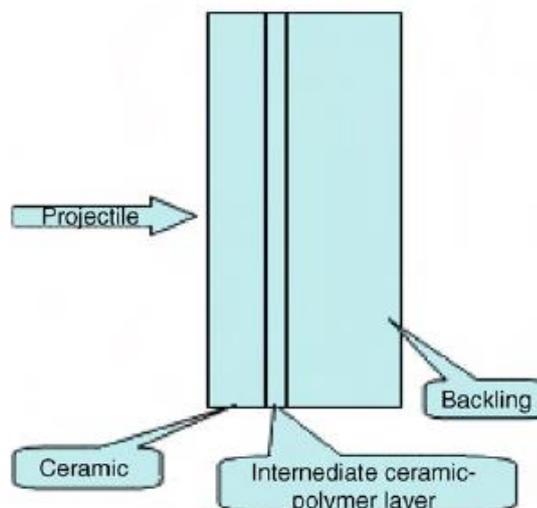
La capacidad defensiva de los materiales cerámicos se basa en su habilidad para detener el proyectil. Ciertamente estos materiales no son reconocidos por su tenacidad, de hecho, son materiales frágiles. Entonces, ¿cómo un material frágil puede tener esa gran capacidad de defensa balística? Pues bien, cuando el material recibe un impacto, este se fractura en miles de partículas en forma de polvo o pequeños fragmentos, los cuales al ser comprimidos son los encargados de detener por completo al proyectil.



**Figura 3-4. Experimento balístico sobre placa de cerámica de alúmina-mullita con proyectiles de 7,62x51 mm disparados por una M16. Se producen seis impactos sin perforación en el material [28].**

El comportamiento de una placa de cerámica ante un impacto por proyectil suele ser por lo general de un mismo modo. En el primer instante de contacto, el proyectil, que es menos resistente a compresión que la placa, se deforma y sufre su rotura; la fuerza del impacto sobre la placa se distribuye sobre un área circular debido a la resistencia a tracción del material; el área donde se han distribuido los esfuerzos sufre una fractura y los pequeños fragmentos del material erosionan el proyectil, cuanto más dureza posea el material, mayor abrasión realizará. A juzgar por el proceso, se puede concluir que las propiedades más influyentes en estos materiales son su resistencia a compresión, resistencia a tracción y la dureza. Tampoco se deben olvidar su baja densidad y su elevado límite elástico.

Varios estudios han demostrado que las propiedades y aplicaciones de los materiales cerámicos en este aspecto pueden mejorar notablemente con la adición de una envoltura de otro tipo de material a la placa cerámica. Estos otros elementos son tales como materiales dúctiles como el aluminio o materiales con una alta capacidad de absorber impactos como el Kevlar. Estos estudios argumentan que el ser envueltos en capas de estos otros materiales otorgan capacidades de frenar una gran variedad de proyectiles. La desventaja de añadir estas capas es un aumento también del peso de la placa de protección.



**Figura 3-5. Propuesta de una placa de tres componentes hecha a partir de material cerámico [28].**

En la Figura 3-5 se observa una propuesta de una placa de cerámica reforzada por una capa de polímero o de composite formado por cerámica-polímero y con un sustento que hace de soporte en la parte posterior de la placa. Estos soportes suelen ser por lo general de materiales dúctiles y metálicos.

Sin embargo, estas características antiproyectil se deterioran en el material a medida que este recibe impactos, debido a que su estructura cada vez será menos consistente y su resistencia a compresión disminuirá exponencialmente. Según experimentos balísticos, placas cerámicas con espesores entre 5 y 9 mm sólo pueden soportar sin ser perforados un número de unos tres impactos. Debido a estos hechos, es necesario proveer de unos espesores mayores que los estudiados. Aun así, estos datos dependen del tipo de munición empleada.

### 3.4.3 Polímeros en protección balística

Los polímeros son de un uso más reducido en estos ámbitos, reduciéndose a unos pocos materiales poliméricos que sean de utilización para este empleo.

La ventaja de estos materiales es su polivalencia. Ya que sus propiedades son fácilmente modificables dentro de unos límites. Por lo general se trata de materiales bastante ligeros, con buenas capacidades mecánicas.

Uno de los principales materiales de este tipo son las fibras de aramida. Las fibras de aramida son unas fibras con una alta resistencia mecánica y térmica. Presentan una rotura dúctil, a diferencia de las fibras de carbono, que presentan una rotura frágil. Esto les proporciona una gran capacidad para absorber impactos sin que sus propiedades estructurales y mecánicas se vean significativamente afectadas.

El principal uso de las aramidias es para fines militares y de seguridad. Entre ellos, pueden ser destinadas a fines balísticos o de protección individual o colectiva, como hemos visto anteriormente que podían ser usadas para revestimientos de protecciones cerámicas.

El mayor hándicap de estos materiales es su rápido deterioro frente a la humedad. Por lo que las aplicaciones en un barco podrían parecer que pueden verse reducidas, sin embargo, estas fibras en la mayor parte de los casos constituyen de un refuerzo intermedio entre la parte superficial y la parte interna del casco de protección del barco.

Un ejemplo de estas fibras son las ABA (ARMAT Ballistic Aramide), desarrolladas por la empresa ARMAT. Según estos, las placas de aramida que ellos desarrollan son capaces de absorber una enorme

cantidad de energía de impacto, siendo de un material ligero y flexible. Es además en relación resistencia/peso cinco veces más fuerte que algunos aceros.

Otro de los productos de materiales poliméricos en protección balística que desarrolla ARMAT es el polietileno balístico ARMAT (ABP). Estas soluciones balísticas son más avanzadas que las fibras de aramida en cuanto a capacidad de reducción de impacto. Este polietileno es, en realidad, fabricado a partir de fibras poliméricas que han sido prensadas y comprimidas a altas presiones para optimizar su comportamiento frente a impactos a alta velocidad. Es, además, capaz de resistir a múltiples impactos de calibres de hasta 12,70 mm.

Pero sin lugar a dudas, el material más comercializado son las fibras de aramida denominadas como Kevlar, desarrollado principalmente por la industria DuPont. El kevlar es una poliamida con una enorme tensión de rotura y resistencia. Además, presenta una resistencia a tracción ocho veces más que el acero; por otra parte, es también un excelente aislante térmico, resistiendo temperaturas de hasta 420 °C. Es por ello que el kevlar tienen unas propiedades excelentes para la elaboración de tejidos antibalas. Consiguiendo frenar la fuerza cinética del proyectil y absorber la energía de impacto de este. Otra de sus enormes ventajas es su increíble ligereza.

El recorrido del proyectil balístico en su fase de vuelo sigue una rotación sobre su eje longitudinal para obtener la precisa estabilidad en su trayectoria. Al incidir el proyectil sobre el tejido de Kevlar, las fibras de aramida que lo componen se enredan sobre el proyectil, ayudando enormemente a frenar su avance. Esto pone en manifiesto las excelentes cualidades del Kevlar en la protección balística.

Desde otro punto de vista, el Kevlar pierde mucha de su efectividad si ha de enfrentarse a proyectiles de núcleo duro. Ya que este sigue una trayectoria recta y al impactar, el núcleo continúa su avance y es capaz de apartar las fibras de aramida, incidiendo en el interior de la coraza.

### *3.4.4 Composites en protección balística*

Este último grupo de materiales a desarrollar puede resultar el más extenso debido a que existen una infinidad de combinaciones matriz/refuerzo a implantar en la fabricación de un composite para fines balísticos. Es por ello que en este punto se van a definir los compuestos más representativos de los que ya se disponga de estudios y experimentos realizados en estos aspectos.

Como ya se dijo en un punto anterior, los composites pueden estar formados a partir de varios tipos de matrices, siendo los más comunes los formados a partir de matriz polimérica. Normalmente cuando se trata de aplicaciones relacionadas con la protección, a estas matrices se les refuerza con polvos cerámicos para así conseguir un gran aumento en su dureza y resistencia. En este aspecto también es común encontrar composites formados justo al contrario, es decir, composites de matriz cerámica y reforzados con fibras poliméricas para otorgarles mayor flexibilidad y elasticidad.

Por lo general, los composites y los materiales poliméricos suelen ir muy de la mano, ya que los polímeros en la protección balística aparecen en casi todo tipo de composición. Por ello, no es raro que durante la definición de este último grupo de materiales se hagan muchas referencias a otros materiales de protección poliméricos.

La incorporación de nuevos compuestos ha supuesto un increíble avance en materiales de protección para defensa y un aumento en el repertorio de elementos de protección.

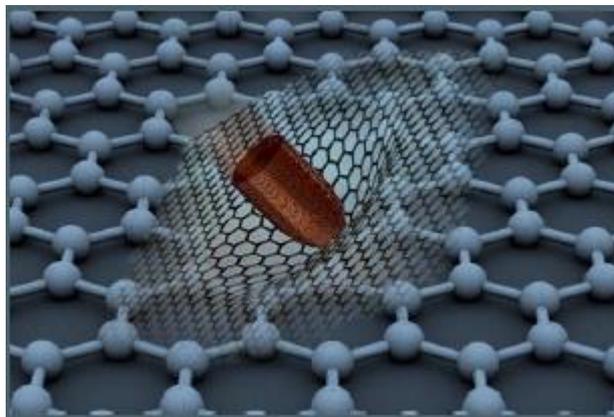
El empleo de composites para protección en barcos puede desarrollarse conforme a dos maneras: En una como placa posterior a la coraza capaz de frenar impactos de alto poder perforante, actuando como sistema de sujeción de fragmentos; o puede actuar como *liner*, esto es, una defensa que sirve para retener metralla proveniente de otros impactos o explosiones.

Los blindajes hechos en su totalidad a base de materiales compuestos suelen ser de aplicación para corazas personales en las que la protección balística no es muy exigente, debido a que los calibres que

debe detener son por lo general menores, y en cullos blindajes las características de un bajo peso toman una gran importancia.

Uno de los principales compuestos empleados es la incorporación a los tejidos poliméricos de varias fibras de Kevlar, obteniendo así un blindaje bastante rígido. En estos casos, las fibras de aramida son prácticamente las únicas que contribuyen a la detención de proyectil, siendo la matriz la encargada de otorgar el sustento estructural y la consistencia.

Uno de los compuestos que mayor hueco se está haciendo en este terreno son los hechos a base de refuerzos y fibras de grafeno. Diversos estudios desarrollados en la Universidad Politécnica de Cartagena y respaldados por experimentos realizados en algunas unidades de la Infantería de Marina sitúan al grafeno como uno de los componentes para composites más prometedores para la fabricación de elementos protectores y blindajes [29].



**Figura 3-6. Representación del funcionamiento del grafeno ante impactos balísticos [29].**

Estos composites son fabricados a partir de laminados de matrices de resinas y reforzados con fibras de grafeno. Las capacidades que puede alcanzar este material han sido testadas en colaboración el Tercio de Levante. Las municiones empleadas llegaron hasta calibres de 7,62 mm [29].

Adentrandonos más en el término naval, recientemente ha sido descubierto otro material compuesto desarrollado en los astilleros de Santa Pola, Alicante, y en colaboración con el Instituto Tecnológico de Plástico. Este nuevo compuesto es ideado sobretodo para la protección de los barcos frente al ataque de piratas con municiones hasta 7,62 mm. El material está formado a partir de matriz cerámica y reforzado con fibras de vidrio y aramida. Esto le permite al material cerámico una mejor capacidad de deformación de la bala y absorción del impacto, superando en muchas cualidades a los aceros [30].

### **3.5 Proceso de obtención de la información**

Como ya se dijo anteriormente, el proceso que se ha seguido para la obtención de la información ha sido mediante dos métodos:

Por un lado, gran parte de la información ha sido recolectada mediante la encuesta realizada. La información que se buscaba era con relación a los materiales de protección y sus características. Esta encuesta fue destinada a personal de distinta índole, siendo desde militares de alto rango, pasando por alumnos tanto civiles y militares y terminando en trabajadores civiles de industrias y empresas relacionadas con la protección balística y el ámbito naval.

Esta información obtenida mediante la encuesta ha sido principalmente destinada para más adelante realizar el método de AHP.

El otro modo que se ha seguido para conseguir la documentación oportuna para el desarrollo de este trabajo ha sido mediante investigación y proceso bibliográfico. Este camino ha sido el que ha proveído de la mayor parte de la información necesaria con respecto a los métodos de protección existentes y los distintos tipos de materiales empleados y sus características.

Atendiendo a las distintas familias de los materiales, se ha confeccionado una tabla (Tabla 3-7) en la cual se relaciona cada tipo de material con la correspondiente información, normativas y, en definitiva, literatura en la cual se documenta su uso en términos de protección balística.

<b>Familia</b>	<b>Tipo</b>	<b>Documentos existentes ligados al ámbito de protección</b>
Metales	Aceros	[31] [32] [33] [34] [35] [36] [24] [37] [23]
	Aleaciones de otros metales	[38] [26]
Cerámicas	Alúmina	[28] [39] [40]
	Vidrios	[41]
Polímeros	Aramida	[42] [43] [44] [45]
	Fibra de vidrio	[46]
	Polietileno	[47]
	Compuestos con grafeno	[48] [29] [49] [50]
Materiales compuestos	Polvo cerámico, fibra de vidrio y resina de poliéster	[51] [52]
	Cerámica y polímero	[53] [54]
	Otros	

---

**Tabla 3-7. Listado de Materiales y Documentación. Elaboración Propia.**

### **3.6 Descripción del método AHP**

La esencia del método AHP ya ha quedado definida previamente y se han enunciado los fundamentos en los que se basa y sus objetivos. Ahora el objeto de este apartado es proceder a explicar en profundidad como se realiza el método y los pasos a seguir.

A modo de guía, en la Figura 3-7 se muestran resumidamente los pasos a seguir:



Figura 3-7. Esquema de proceso de AHP. Elaboración propia.

El primer paso es, obviamente, definir el problema para el que se van a presentar las diferentes alternativas. Puede parecer pueril, pero es altamente necesario tener una depurada visualización sobre qué es lo que se quiere alcanzar, de qué opciones disponemos para alcanzarlo y bajo qué criterios han de estar condicionadas las alternativas. Por ello es importante disponer de todos los datos necesarios para implementar nuestro caso en el método.

Normalmente la secuencia que se sigue es sintetizar el problema o la motivación, a continuación, se eligen las alternativas que tenemos previsto emplear para la resolución y por último se hace la lista de criterios que queremos tener en cuenta para tomar la elección. Para hacer la elección de criterios, hay que tener en cuenta que los que elijamos deben poder ser cuantificables. De lo contrario, estos no se podrían medir ni comparar.

Este primer proceso de definir el problema, alternativas y criterios ya ha quedado claro en los anteriores capítulos, por lo que no es necesario mayor detenimiento en este apartado.

La siguiente tarea es realizar la ponderación de los criterios escogidos. Una vez definidos los criterios, estos deben ser ponderados de manera que se decida el grado de implicación de cada uno de ellos en el objetivo propuesto. Para ello se debe utilizar la escala de ponderación pareada que se mostró anteriormente (Tabla 2-2) diseñada por el Profesor Saaty, en la cual a cada grado de implicación se le otorgaba un valor que se encontraba en el rango entre 1/9 y 9 [20].

Una vez realizada la valoración de los criterios, es hora de confeccionar una Matriz de Comparación Pareada (MCP) e implementar los criterios seleccionados en ella. El objetivo de plasmar los criterios en la matriz es el poder tomar una comparación entre todos ellos por pares en función de su importancia. En la imagen siguiente se muestra un ejemplo de una MCP (Figura 3-8).

	1	2	3	n
1	1	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{1n}$
2	$a_{21}$	1	$a_{23}$	$a_{2n}$
3	$a_{31}$	$a_{32}$	1	$a_{3n}$
n	$a_{n1}$	$a_{n2}$	$a_{n3}$	1

Figura 3-8. Matriz de Comparación Pareada. Elaboración propia.

El rango de la matriz dependerá del número de criterios que se estén comparando. En la matriz se compara cada criterio con el resto, para saber el número de comparaciones de manera analítica se emplea la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ de comparaciones} = \frac{n \times (n - 1)}{2} \quad (1)$$

Siendo  $n$  el valor del rango de la matriz.

Aunque en la matriz hay mayor número de espacios que de comparaciones según la anterior fórmula, los valores que se encuentran por debajo de la diagonal principal representan el inverso a su valor simétrico. Por lo tanto, el número de comparaciones a realizar es también igual al número de espacios de la matriz que se encuentren por encima de la diagonal principal. Esta característica es conocida como la reciprocidad de la matriz [55].

- La reciprocidad de la MCP se puede definir por la fórmula que se muestra seguidamente:

$$\text{Si } a_{ij} = x, \text{ entonces } a_{ji} = \frac{1}{x}, \quad \text{con } \frac{1}{9} \leq x \leq 9 \quad (2)$$

Además de la reciprocidad, la MCP debe cumplir dos requisitos más [55], los cuales se definen a continuación:

- Homogeneidad. Si los elementos  $i$  y  $j$  se consideran de igual importancia, se cumplirá:

$$a_{ij} = a_{ji} = 1 \quad (3)$$

Además,  $a_{ii} = 1$  para todo  $i$

- Consistencia:

$$\text{Se satisface que } a_{ik} \times a_{kj} = a_{ij} \text{ para todo } 1 \leq i, j, k \leq q \quad (4)$$

Finalizada la matriz, hay que hacer una comprobación previa que nos muestra el grado de consistencia de la matriz. El grado de consistencia es de utilidad para saber si los datos introducidos en la matriz son fiables para llegar a una conclusión de calidad [56]. Al tratarse de valoraciones tomadas por personas, no ordenadores, habrá que tener en cuenta que en este método siempre se puede encontrar cierto grado de subjetividad.

A su vez, de la matriz hay que obtener también su vector propio, el cual nos indicará la importancia que se le da a cada criterio [56].

Una vez ponderado cada criterio, la siguiente fase es hacer la relación de cada alternativa con los criterios. Para ello hay que volver a confeccionar una MCP, pero esta vez con respecto a las alternativas y en función de cada criterio. Habrá que realizar los mismos procedimientos de comprobación y de vector propio que hemos hecho anteriormente. De manera que obtendremos una ponderación de idoneidad de las alternativas en función al criterio que se esté refiriendo la matriz [56]. Este proceso habrá que realizarlo tantas veces como criterios hayamos tenido en cuenta en la primera MCP.

De manera que finalmente tendremos el vector propio correspondiente a la MCP de los criterios y otro vector propio por cada MCP de las alternativas en función de cada criterio. El siguiente paso es obtener, en función de estos vectores propios que hemos calculado, la ponderación de las alternativas en función de todos los criterios y de su importancia. Con este último cálculo obtenemos un porcentaje que nos indica la idoneidad de la alternativa final con respecto a la totalidad de los criterios planteados [56].

Más adelante se explicará como se han realizado las comprobaciones de consistencia de cada MCP y los cálculos para obtener el vector propio y la final ponderación de las alternativas.



## 4 RESULTADOS

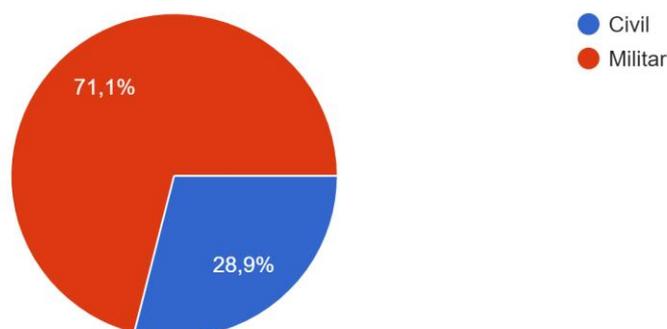
### 4.1 Descripción de la muestra obtenida

La encuesta realizada tiene como fin la obtención de información procedente de una gran variedad de sujetos y a su vez permite recoger opiniones que ayuden a la selección final de la alternativa más idónea.

Se confeccionó la encuesta mediante la plataforma online que ofrecen las aplicaciones de Google, “Formularios de Google” [57]. Dicho software es totalmente gratuito y de uso intuitivo, además de permitir la difusión de los mismos de forma sencilla y posteriormente poder analizar los resultados.

Así, los resultados que fueron recojidos de la encuesta fueron la fuente de información que alimentó la ejecución del método AHP empleado en este trabajo. De esta forma, la idoneidad que resultara del proceso de cálculo de AHP sería fruto de las valoraciones y opiniones de la diversidad de encuestados. El género de encuestados engloba tanto personal civil como militar Figura 4-1.

¿Es usted civil o militar?  
114 respuestas



**Figura 4-1. Ratio de participación militar/civil en la encuesta. Obtenido de Google Formularios.**

En el diagrama expuesto se observa que la ratio de participantes militares es mucho mayor, siendo un 71,1% de 114 respuestas, es decir, 81 encuestados eran militares. Dentro de este grupo se encuentra una gran diversidad de empleos y cuerpos. Más adelante se hará un mayor hincapié en esta diversidad.

Por lo tanto, el 28,9% restante corresponde a los 33 civiles que respondieron la encuesta. Al igual que con el grupo de encuestados pertenecientes al ejército, el grupo de civiles es conformado por individuos de profesiones muy variadas que luego serán analizadas.

Es interesante hacer una distinción de resultados entre el personal civil y el personal militar, ya que las respuestas obtenidas por cada grupo de ellos pueden ser significativamente diferentes en algunos aspectos. También será analizado este aspecto más adelante, junto a la variedad de personal encuestado civil y militar.

En la encuesta detallada, se les pedía a los participantes que respondieran sobre dos aspectos. Por un lado, que eligieran qué material, entre las cuatro alternativas que tenemos en este caso, es bajo su criterio el más apropiado para conformar blindajes. El otro tipo de preguntas eran sobre la elección de la relevancia de las características que debiera poseer aquel material que hayan seleccionado.

A la hora de plasmar los resultados obtenidos de la encuesta en las matrices de comparación pareada, una dificultad que se encontró fue hacer una correlación entre la escala que contenían las preguntas de la encuesta realizada y la escala de Saaty para implementar en las MCP.

La encuesta poseía una escala del 1 al 5, mientras que Saaty defendía la implementación de una escala con nueve valores (los números impares que se encuentren entre 1/9 y 9). Esta dificultad hubiera sido solventada si desde un principio en las preguntas cuestionadas se hubiera optado por una escala igual a la de Saaty, sin embargo, la experiencia y varios estudios psicológicos argumentan que cuantas más opciones se le dan al individuo, más difícil le es elegir una opción que le satisfaga. Por lo tanto, el número óptimo de opciones es el de cinco.

En base a esto, se ha diseñado una tabla que haga la correlación entre la escala empleada en las preguntas y la escala de Saaty para así poder incorporar los resultados a las MCP de manera objetiva Tabla 4-1.

<b>Escala propia</b> <b>Opción 1 vs Opción 2</b>	<b>Escala de Saaty</b>
1	9
2	5
3	1
4	1/5
5	1/9

**Tabla 4-1 Correspondencia Escala propia/Escala Saaty. Elaboración propia.**

Para confeccionar dicha tabla se optó por eliminar los valores que se encontraban en el medio entre los extremos (1/7, 1/3, 3 y 7).

Para conseguir un único valor entre todas las respuestas obtenidas, lo apropiado es calcular la mediana del conjunto de todas ellas. De esta manera el resultado que se obtiene resulta del valor de la opción que se encuentre en la posición central de todo el conjunto de respuestas [57].

## 4.2 Método AHP

### 4.2.1 Ponderación de criterios

Los resultados recogidos en la encuesta sirvieron para cuantificar la prioridad que se le deben dar a los criterios. De esta manera, los valores que se obtengan de dicha muestra son los que se utilizarán para rellenar la MCP de los criterios.

Una vez obtenidos los valores que se van a introducir en las matrices, solo queda aplicar la herramienta.

El primer paso es calcular la prioridad de los criterios. Para ello se introducen los datos de las comparaciones en los espacios correspondientes por encima de la diagonal principal de la matriz. El resto de espacios son calculados de manera instantánea, ya que los valores de la diagonal principal son siempre 1 y los valores por debajo de esta corresponden al valor inverso de su simétrico.

De manera que obtenemos la matriz de valores de la Tabla 4-2:

CRITERIOS	Coste	Peso	Resistencia estructural	Calidad Balística	VECTOR DE PRIORIDAD
Coste	1	1	1/9	1/9	6,068%
Peso	1	1	1/5	1/5	6,553%
Resistencia estructural	9	5	1	1	43,689%
Calidad balística	9	5	1	1	43,689%
SUMA	20	12	2,311	2,311	100 %
<b>TOTAL SUMA 36,622</b>					

Tabla 4-2. Matriz de comparación de los criterios.

En base a los resultados que se muestran en Tabla 4-2, los criterios más relevantes en la selección del material de blindaje son dos a la par: la calidad balística y la resistencia estructural. Mientras que los otros dos criterios (peso y coste) son claramente de menor importancia para los encuestados.

Huelga decir que los resultados de esta primera Matriz de Comparación de Criterios por pares (MCP) son enteramente obra de las respuestas obtenidas en la encuesta. A continuación, se adjuntan el resto de MCP's, estas corresponden a la idoneidad de cada alternativa en función del criterio con el que se está relacionando.

### 4.2.2 Ponderación de alternativas: panel de expertos

Para la implementación de los valores en el resto de matrices, donde la comparación se realiza entre el material y el criterio, ya no se ha seguido optando por las respuestas de la encuesta, ya que, al no tratarse de una encuesta a expertos, los valores obtenidos son muy dispares y en muchos casos denota cierta subjetividad. Por lo que se detectaba un bajo grado de consistencia de las matrices.

Por ello, los valores seleccionados en las siguientes matrices son como resultado del estudio de las características y capacidades de las diferentes alternativas. Para llevar a cabo estos estudios, se recurrió a diversos informes y análisis del comportamiento de determinados materiales en relación con una serie de características [58]. Además, se confeccionó otra encuesta distinta, esta vez dirigida a personal especialista en las materias de ingeniería de materiales o construcción naval.

El hecho de que el público elegido esta vez fuera experto en el campo, provocó que la cantidad de participantes fuera muy reducido, siendo estos sólo tres expertos.

Los datos recogidos en dicha encuesta proporcionaban una idea de cuan idóneos eran los distintos materiales en función de los criterios elegidos. Apoyándose en los resultados de los tres expertos y en los estudios que ya se han mencionado, fue posible la confección de la Tabla 4-3, en la que se muestran las características de cada material para los criterios expuestos.

	<b>Coste</b>	<b>Peso</b>	<b>R. Estructural</b>	<b>C. Balística</b>
<b>Metales</b>	Apropiado	Poco apropiado	Muy apropiado	Muy apropiado
<b>Polímeros</b>	Sin influencia	Poco apropiado	Sin influencia	Apropiado
<b>Cerámicas</b>	Apropiado	Apropiado	Poco apropiado	Sin influencia
<b>Composites</b>	Poco apropiado	Muy apropiado	Apropiado	Apropiado

Tabla 4-3. Relación de la idoneidad de los materiales con respecto a los criterios. Elaboración propia.

#### 4.2.3 MCP's alternativa/criterio

Finalizado este estudio, se pudo hacer la valoración de los materiales con respecto al criterio y dar paso a la ejecución de las MCP's que representan el porcentaje de la propiceidad de cada material con el criterio que se esté estudiado en cuestión. De manera que, en cuanto al primer criterio, obtenemos los datos de la Tabla 4-4

<b>CRITERIO COSTE</b>	<b>Metales</b>	<b>Polímeros</b>	<b>Cerámicas</b>	<b>Composites</b>	<b>VECTOR DE PRIORIDAD</b>
<b>Metales</b>	1	1	5	9	42,155%
<b>Polímeros</b>	1	1	5	9	42,155%
<b>Cerámicas</b>	1/5	1/5	1	3	11,593%
<b>Composites</b>	1/9	1/9	1/3	1	4,098
<b>SUMA</b>	2,311	2,3	11,333	22	100 %
<b>TOTAL SUMA 37,956</b>					

Tabla 4-4. MCP en relación al coste.

En esta primera MCP se observa la relación de las diferentes alternativas con el criterio del coste. En la columna del vector prioridad se nos muestra cuál de las cuatro alternativas resulta la más idónea teniendo en cuenta este criterio, que resulta ser los materiales metálicos. Sin embargo, como se ha podido ver en la Tabla 4-2, el criterio del coste tiene muy poco peso en comparación a los dos últimos. Por lo tanto, la idoneidad del material con respecto a este criterio es de una relevancia relativa.

<b>CRITERIO PESO</b>	<b>Metales</b>	<b>Polímeros</b>	<b>Cerámicas</b>	<b>Composites</b>	<b>VECTOR DE PRIORIDAD</b>
<b>Metales</b>	1	1/5	1	1/9	5,707%
<b>Polímeros</b>	5	1	9	1	39,474%
<b>Cerámicas</b>	1	1/9	1	1/9	5,482%
<b>Composites</b>	9	1	9	1	49,342%
<b>SUMA</b>	16	2,311	20	2,2222	100 %
<b>TOTAL SUMA 40,533</b>					

Tabla 4-5. MCP en relación al peso.

En este caso la relación se hace con respecto al peso del material. En esta ocasión la prioridad la tienen los materiales poliméricos, puesto que son los que mejores características, con respecto al peso, ofrecen. Aun así, cabe destacar que al igual que hemos visto previamente con el criterio del coste, el peso no ofrece una importancia significativa.

CRITERIO RESISTENCIA ESTRUCTURAL	Metales	Polímeros	Cerámicas	Composites	VECTOR DE PRIORIDAD
Metales	1	9	5	3	55,939%
Polímeros	1/9	1	1	1/5	7,182%
Cerámicas	1/5	1	1	1/3	7,873%
Composites	1/3	5	3	1	29,066%
SUMA	2,311	16	12	2,4	100 %
<b>TOTAL SUMA 32,711</b>					

Tabla 4-6. MCP en relación a la Resistencia estructural.

Para esta situación, es obvio que los materiales metálicos son los más apropiados, puesto que son los más utilizados en labores etructurales debido a sus excelentes características para estos usos. Es además algo a considerar que los materiales metálicos son los materiales más utilizados en la construcción de barcos, a excepción de algunos composites y fibras en determinados casos. Es por ello que el material que precede al metal son los composites, aunque es notoria la diferencia en la idoneidad del metal sobre estos. En cuanto a las otras dos alternativas, son de unas aptitudes menos apropiadas para estos fines, por ello su porcentaje de prioridad es bastante reducido.

CRITERIO CALIDAD BALÍSTICA	Metales	Polímeros	Cerámicas	Composites	VECTOR DE PRIORIDAD
Metales	1	9	3	3	49,724%
Polímeros	1/9	1	1/5	1/5	4,696%
Cerámicas	1/3	5	1	1	22,79%
Composites	1/3	5	1	1	22,79%
SUMA	1,778	20	5,2	5,2	100 %
<b>TOTAL SUMA 32,178</b>					

Tabla 4-7. MCP en relación a la Calidad balística.

Realizar esta comparación es la más dificultosa, puesto que la finalidad del presente trabajo consiste en seleccionar el material más apropiado y la calidad balística cumple un papel fundamental en dicha selección, a pesar de que el porcentaje del vector prioridad sea el mismo tanto para la resistencia estructural como para la calidad balística.

De hecho, cuantificar una valoración de la calidad balística en materiales que ya han sido testados en diferentes estudios y experimentos balísticos, dando constancia de sus buenas cualidades para ser empleados con fines de defensa y protección es un proceso que necesita de hacerse una reflexión detenida. Finalmente se optó por los valores implementados en la matriz de la Tabla 4-7, donde los materiales de polímero, a pesar de seguir siendo un gran material antibalas, denota menos cualidades que los cerámicos, metálicos y composites.

En el caso de que fuese necesario realizar una valoración de estos tres materiales más precisa sería conveniente realizar experimentos, simulaciones o análisis numéricos que pongan de manifiesto una cuantificación objetiva de la comparación de sus propiedades.

#### 4.2.4 Análisis de la consistencia

Además de los resultados obtenidos en las MCP's, es necesario argumentar si dichos resultados son de utilidad o si, por el contrario, no son de gran ayuda debido a que se basan en datos subjetivos o de poca consistencia y lo mejor sería deshechar esos datos y realizar una nueva matriz.

Para ello, lo propio es adjuntar el coeficiente de consistencia de cada una de las matrices y decidir en base a este cociente si la matriz es útil o si tiene que repetirse la ponderación de las variables.

El cálculo del coeficiente de consistencia se realiza de la siguiente forma:

- En primer lugar, hay que calcular el índice del Valor Máximo de Eigen ( $\lambda_{max}$ ). Este valor se calcula de los datos de las matrices. Resulta de hacer el sumatorio de los productos del vector prioridad de cada alternativa por la suma de sus ponderaciones. A modo de ejemplo se incluye la fórmula seguida para calcular  $\lambda_{max}$  en la Tabla 4-2.

$$\lambda_{max} = (0,0606 \times 20) + (0,0655 \times 12) + (0,4367 \times 2.311) + (0,4367 \times 2,311)$$

$$\lambda_{max} = 4,0194$$

- Lo siguiente a hacer es a partir de  $\lambda_{max}$  se calcula el índice de consistencia (CI). Para ello se ha de emplear la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{5}$$

Siendo  $n$  el rango de la matriz.

- Además de todo esto, se ha de obtener el número del índice de consistencia aleatoria (RI). El índice aleatorio corresponde al índice de consistencia de una MCP generada de forma aleatoria. El RI depende del número de opciones que se están comparando en la matriz, como se puede ver en la Tabla 4-8.

Nº de elementos que están siendo comparados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.882	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 4-8. Correspondencia de índices aleatorios en función del número de elementos [55].

También existe una fórmula que nos permite calcular el RI [55]:

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} \tag{6}$$

Sin embargo, para los cálculos realizados en este caso se ha optado por los datos que aporta la tabla Tabla 4-8.

- Por último, se calcula finalmente el Cociente de Consistencia (CR) según la fórmula:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Gracias al cálculo de la CR, se puede obtener una aproximación de bastante precisión en la consistencia de la matriz y los datos que contiene. Para saber si la matriz es consistente hay que comparar los resultados que se obtengan mediante el proceso de cálculo con los datos que a continuación en la Tabla 4-9 se muestran:

**Rango de Matriz    % Máximo de CR**

3	5%
4	9%
≥5	10%

**Tabla 4-9. CR máximo en función del número de variables [20].**

Si se da el caso en que el CR que se ha calculado es mayor que el correspondiente según Tabla 4-9, significará que la información que se está introduciendo para la decisión no es correcta y por lo tanto esa matriz no nos proporcionará datos fiables.

Las tablas que a continuación se representan, exponen los cálculos realizados para hallar el CR de cada MCP.

**Matriz de Criterios**

<b>λ máx.</b>	4,0194
<b>CI</b>	0,00647
<b>RI</b>	0,882
<b>CR</b>	0,73%

**Tabla 4-10. Consistencia MCP de los criterios.**

**Matriz de Costes**

<b>λ máx.</b>	4,1639
<b>CI</b>	0,05464
<b>RI</b>	0,882
<b>CR</b>	6,2 %

**Tabla 4-11. Consistencia MCP de costes.**

**Matriz de Pesos**

<b>λ máx.</b>	4,0175
<b>CI</b>	0,00584
<b>RI</b>	0,882
<b>CR</b>	0,66%

**Tabla 4-12. Consistencia MCP de pesos.**

<b>Matriz de Resistencia Estructural</b>	
<b>λ máx.</b>	4,1712
<b>CI</b>	0,05709
<b>RI</b>	0,882
<b>CR</b>	6,47%

Tabla 4-13. Consistencia MCP de resistencia estructural.

<b>Matriz de Calidad Balística</b>	
<b>λ máx.</b>	4,1933
<b>CI</b>	0,06445
<b>RI</b>	0,882
<b>CR</b>	7,31%

Tabla 4-14. Consistencia MCP de calidad balística.

Un detalle a tener en cuenta es que conforme el rango de la matriz es menor, la facilidad para obtener datos con una consistencia inaceptable aumenta progresivamente. A pesar de esto, el CR en todas las matrices es perfectamente aceptable.

#### 4.2.5 Matriz de prioridad global

Antes de finalizar el proceso AHP hay que realizar la generación de la matriz de prioridad global, la cual se encarga de distribuir a cada alternativa su apropiado porcentaje de idoneidad en función de lo adecuada que sea la alternativa con respecto a los criterios.

En este caso, se agrega seguidamente la matriz que señala cuales son las prioridades de nuestra encuesta y, por lo tanto, las prioridades que puedan tenerse a la hora de seleccionar el material de defensa balística.

	<b>Coste</b>	<b>Peso</b>	<b>Resistencia Estructural</b>	<b>Calidad Balística</b>
<b>PRIORIDAD</b>	<b>6,068%</b>	<b>6,553%</b>	<b>43,689%</b>	<b>43,689%</b>
<b>Metales</b>	42,155%	5,702%	55,939%	49,724%
<b>Polímeros</b>	42,155%	39,474%	7,182%	4,696%
<b>Cerámicas</b>	11,593%	5,482%	7,873%	22,790%
<b>Composites</b>	4,098%	49,342%	29,006%	22,79%
<b>TOTAL</b>	100%	100%	100%	100%

Tabla 4-15. Matriz de prioridad global.

De esta manera se ofrece una visión general sobre la idoneidad de las alternativas con respecto al criterio que se observe y se indica además el porcentaje de prioridad de cada criterio.

El último punto que nos quedará ahora será procesar la anterior matriz y dar con el material que recoja el mayor porcentaje de adecuación.

#### 4.2.6 Resultado AHP

Tras haber realizado la matriz prioridad, hallar los resultados es un proceso muy sencillo.

Si nos fijamos en la Tabla 4-15, si a cada una de las cuatro columnas se les quita la primera fila, las columnas que queda corresponden a los vectores de prioridad de cada una de las MCP que se expusieron previamente. En cambio, la primera fila que se ha dicho antes, corresponde al vector prioridad de la MCP de los criterios.

Haciendo una simplificación para verlo más claro, nos queda de la siguiente manera:

	Coste	Peso	R. Estructural	C. Balística
<b>Metales</b>	42,155%	5,702%	55,939%	49,724%
<b>Polímeros</b>	42,155%	39,474%	7,182%	4,696%
<b>Cerámicas</b>	11,593%	5,482%	7,873%	22,790%
<b>Composites</b>	4,098%	49,342%	29,006%	22,79%

Tabla 4-16. Vectores prioridad de las alternativas.

<b>Coste</b>	6,068%
<b>Peso</b>	6,553%
<b>R. Estructural</b>	43,689%
<b>C. Balística</b>	43,689%

Tabla 4-17. Vector prioridad de los criterios.

Ahora hacemos el producto matricial de la matriz formada por los vectores prioridad de las alternativas con la matriz columna formada por el vector prioridad de los criterios:

$$\begin{pmatrix} 0,54217 & 0,06311 & 0,48913 & 0,35904 \\ 0,27108 & 0,54612 & 0,07065 & 0,04255 \\ 0,07831 & 0,06311 & 0,07337 & 0,23936 \\ 0,10843 & 0,32767 & 0,36685 & 0,35904 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,06068 \\ 0,06553 \\ 0,43689 \\ 0,43689 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,49095 \\ 0,10334 \\ 0,14459 \\ 0,26111 \end{pmatrix}$$

La matriz columna producto de realizar la multiplicación matricial nos ofrece la ponderación de las alternativas en función de todos los criterios y de su importancia. Si se trasladan estos resultados a un formato más visual, se tendrá:

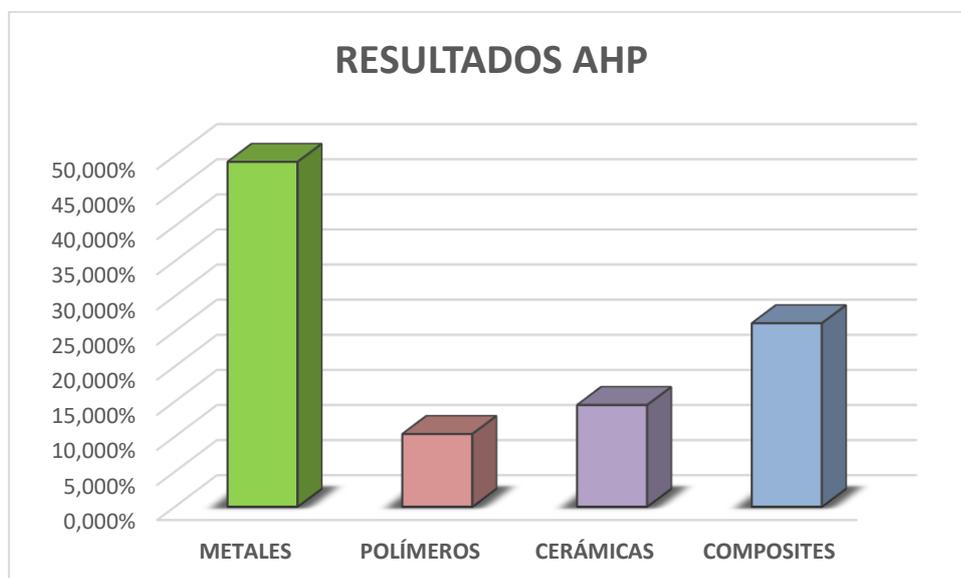


Figura 4-2 Gráfico resultados AHP.

En base a estos resultados, se puede afirmar que los materiales metálicos son claramente los mejores. Fundamentalmente debido a que tanto sus características balísticas como estructurales son bastante apropiadas y son justo estas dos características las que mayor ponderación otorgan.

Les siguen no muy de cerca los composites. Estos se encuentran por debajo debido a que su coste es bastante mayor que los metales, de igual manera, tanto sus capacidades estructurales como balísticas se encuentran algo por debajo de las capacidades de los metales.

Los polímeros y las cerámicas se encuentran claramente en los dos últimos puestos. Esto es debido en una enorme parte a sus características para la resistencia estructural, lo cual les deja en una severa desventaja.

Si recordamos las preguntas que se definieron en la primera encuesta, una batería de seis preguntas iba destinadas a hacer investigación sobre los criterios más importantes en el ámbito de la defensa y otra batería existente de otras seis preguntas diseñada a obtener información sobre qué materiales pueden ser de mayores aptitudes.

Puede resultar interesante hacer la comparación entre los resultados obtenidos ahora de forma analítica y los resultados de la encuesta al preguntar qué materiales se creen que son más efectivos en la protección balística.

Durante la resolución del método AHP se llegó al problema de que, para las respuestas obtenidas en la elección del tipo de material, el cociente de consistencia era intolerable. No hay que olvidar que dicha encuesta está destinada a personal que pueda saber del tema, pero no por ello están obligados a ser expertos en la materia.

Otro factor a tener en cuenta es que algunas de estas preguntas pueden tener un notado carácter subjetivo, dependiendo del individuo que esté realizando la encuesta. Es por ello que el cálculo de los cocientes de consistencia son una parte fundamental en estos procesos valorativos como el AHP, ya que de este modo se elimina en gran medida los ápices que pudieran haber de subjetividad.

Aún así, a pesar de que los datos que se vayan a obtener no dispongan de relevancia y consistencia, puede resultar provechoso realizar la comparación.

Así, la plenitud de las respuestas pudo mostrar los siguientes resultados:

MATERIALES	Metales	Polímeros	Cerámicas	Composites	VECTOR DE PRIORIDAD
<b>Metales</b>	1	1	5	1/5	25%
<b>Polímeros</b>	1	1	5	1	27,778%
<b>Cerámicas</b>	1/5	1/5	1	1/5	5,556%
<b>Composites</b>	5	1	5	1	41,667%
<b>SUMA</b>	7,2	3,2	16	2,4	100 %
<b>TOTAL SUMA</b>	<b>28.8</b>				

Tabla 4-18. Idoneidad de los materiales según encuesta (no consistente).

A juzgar por estos resultados, según los participantes, el mejor material sería el compuesto de composite, seguido de los polímeros y muy cerca de ellos los metales. Estas soluciones son bastante interesantes debido a la disparidad de las respuestas y las conclusiones del método AHP.

### 4.3 Público seleccionado y respuestas obtenidas

En apartados anteriores se enunciaron las diferencias de género en cuanto al personal encuestado. El público seleccionado puede dividirse primeramente en dos grupos diferenciados: personal civil y personal militar. Siendo aproximadamente tres cuartos las respuestas provenientes de miembros de las

Fuerzas Armadas, pertenecientes a diversos cuerpos y rangos; el otro cuarto corresponde al personal de origen civil.

Hacer una diferencia entre estos dos sectores puede ser interesante, ya que se tratan de dos sectores cuya visión de objetivos y prioridades puede diferir bastante. Además, la formación obtenida por cada grupo también es un factor influyente en este caso.

En esta sección se procederá al estudio de las posibles diferencias que pudiera haber en la elección de materiales y criterios para el caso en que solo se considerasen uno u otro grupo de las personas que realizaron la encuesta.

### 4.3.1 Personal militar

Retomando de nuevo, el número de militares que respondieron a la encuesta es de 81 participantes. Entre ellos, el 98% pertenece a la Armada.

Dentro de la Armada, las respuestas obtenidas provienen de cuerpos y rangos muy diferentes. En la Figura 4-3 se muestran las ratios de participación.

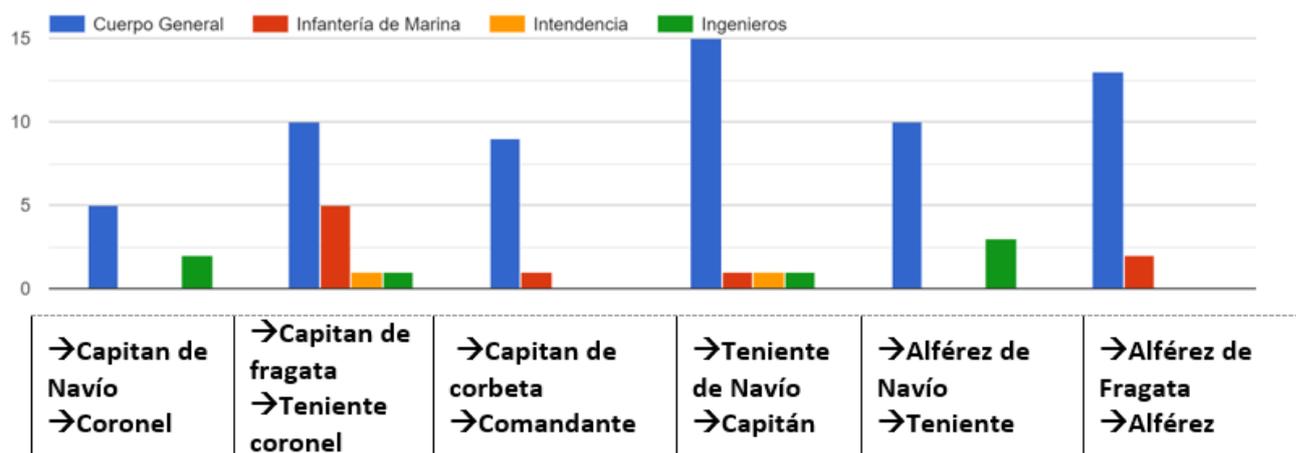


Figura 4-3. Participaciones en el personal militar. Obtenido de Google Informes.

La MCP de criterios en base a sólo los resultados obtenidos por militares se resume en la Tabla 4-19 y en la Tabla 4-20 vemos su grado de consistencia.

CRITERIOS	Coste	Peso	Resistencia estructural	Calidad Balística	VECTOR DE PRIORIDAD
Coste	1	1	1/5	1/5	8,333%
Peso	1	1	1/5	1/5	8,3335
Resistencia estructural	5	5	1	1	41,667%
Calidad balística	5	5	1	1	41,667%
SUMA	12	12	2,4	2,4	100 %
<b>TOTAL SUMA</b>	<b>28.8</b>				

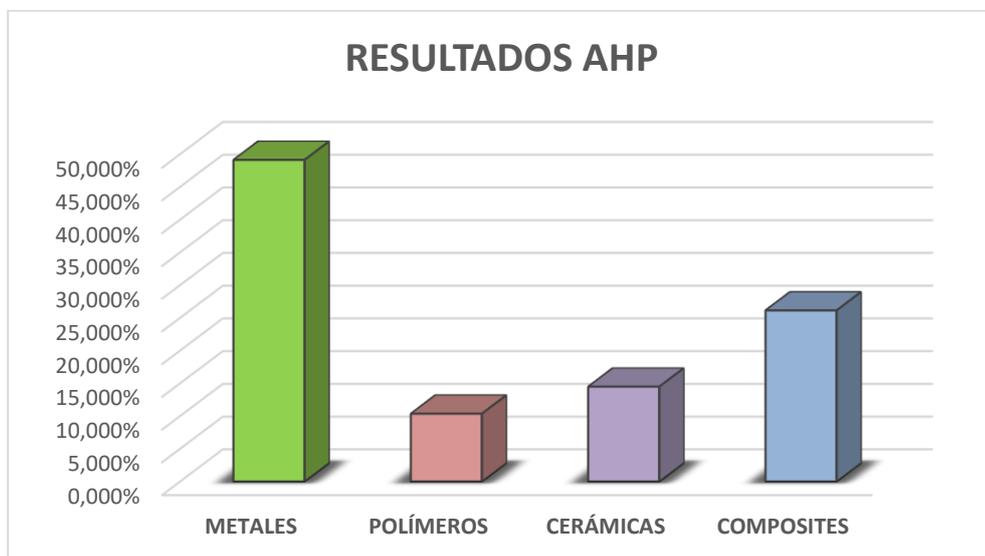
Tabla 4-19. Tabla de MCP de criterios con personal militar.

**Matriz de Resistencia Estructural**

$\lambda$ máx.	4
CI	0
RI	0,882
CR	0%

**Tabla 4-20. Consistencia en MCP de criterios por personal militar.**

Finalmente se desarrolla la matriz de prioridad global y se hayan las soluciones para este caso. Como se puede ver, los resultados son extremadamente parecidos. Difiriendo únicamente en que en estos casos los criterios del coste y el peso toman una ínfima importancia más.



**Figura 4-4. Resultados AHP personal militar.**

### 4.3.2 Personal civil

El personal civil que relizó la encuesta era mucho menor que el militar, siendo 33 civiles los encuestados. Entre ellos, denota una gran diversidad de las profesiones que ocupan. En la Figura 4-5 se muestra un gráfico que muestra esta diversidad.



**Figura 4-5. Diagrama de representación de la participación de civiles. Obtenido de Google Informes.**

La gran mayoría de los civiles desarrollan una actividad relacionada con la rama de Ingeniería Técnico-Industrial. El siguiente grupo más numerosos son los Ingeieros Navales. Les siguen de lejos el resto de profesiones menos frecuentadas.

En cuanto a los cálculos del AHP, se ve en la tabla Tabla 4-21:

CRITERIOS	Coste	Peso	Resistencia estructural	Calidad Balística	VECTOR DE PRIORIDAD
Coste	1	1/5	1/9	1/5	4,208%
Peso	5	1	1/5	1/5	17,822%
Resistencia estructural	9	5	1	1	44.554%
Calidaad balística	5	5	1	1	33,416%
SUMA	12	12	2.4	2.4	100 %
<b>TOTAL SUMA</b>	<b>28.8</b>				

Tabla 4-21. Tabla de MCP de criterios con personal civil.

Para este caso, por desgracia, el cociente de consistencia no cumple con los mínimos para que la matriz sea de aplicación. Dando un CR del 25,3%, un valor mucho más elevado que el máximo del 9%. Por lo tanto, no podrían sernos de aplicación estos datos de no ser por la incorporación de los datos del personal militar.

De todos modos, puede resultar de interés la visualización de la decisión tomada por este género de personas, aunque no sea una solución consistente y no se deba tener en cuenta. El resultado de este grupo se muestra en la Figura 4-6.



Figura 4-6. Resultados AHP personal civil (no consistente).

Como se puede observar, todos los resultados obtenidos, independientemente de a qué grupo se refiera, son muy similares. Esto da razones para pensar en que los resultados obtenidos son consistentes y veraces.



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Expuestos los principales materiales de empleo en el área de la protección balística y sus principales características relacionadas con este campo, la aplicación del método de decisión multicriterio AHP ha sido satisfactoria, permitiendo tomar una decisión sobre la elección de la opción más adecuada. El camino seguido en este análisis se ha construido empleando medios tanto analíticos a la hora de hacer los cálculos y matrices de comparación, como psicológicos basados en convicciones e ideas para conceder a cada criterio y alternativa su correspondiente valoración y ponderación.

El desarrollo del proyecto se centró en un primer instante a la elección del mejor material atendiendo a su coste y su relación con el consumo de la plataforma. Para hacer la asociación del material con el consumo de la plataforma lo más lógico es hacer referencia al peso del material, ya que cuanto más denso sea este, mayor peso aportará y, por tanto, para moverlo será necesario consumir más combustible.

Destacar que, para una correcta aplicación del método AHP se deben considerar el mayor número de variables o criterios. Si no se hace esta consideración, el método de elección multiatributo basado en un número muy limitado de criterios incluiría sesgos que no permitirían una adecuada resolución del problema. Esta es la razón por la que se adjudicaron los conceptos de la resistencia estructural y la calidad balística como variables de selección del material más apropiado para defensa y blindaje en buques de guerra.

Los resultados obtenidos mediante el estudio han permitido obtener la solución a nuestro problema basándonos en las encuestas, en opiniones de expertos y en otros estudios y experimentos ya realizados.

Teniendo presente que las encuestas deben dirigirse a un público concreto con características definidas así, los participantes en la encuesta fueron en mayor o menor grado conocedores de la materia por su relación directa con las áreas de construcción naval, investigación de materiales o el campo militar entre otros.

El método AHP permitirá resultados más ajustados y próximos a la solución más adecuada cuanto mayor sea el grupo de expertos y más se acote el mismo. En el campo de la ingeniería en general esta es una máxima que no se aplica a otras áreas en las que el público en general permite hacer otras aproximaciones ajustadas a soluciones válidas de forma más sencilla.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos, los materiales metálicos vencen indiscutiblemente frente al resto de familias de materiales. Sin embargo, con el avance de la ciencia y

nuevas tecnologías de fabricación, es probable que en un futuro próximo las cualidades que puedan ofrecer las cerámicas o los polímeros sean más aptas para estas labores.

Hablando de los composites, estos se encuentran en un momento de continuo avance, mejora y desarrollo, por lo que no sería de extrañar que estos materiales alcancen muy próximamente a los metales.

Por todo esto se concluye que las herramientas de decisión multicriterio y más concretamente el método AHP, son recursos útiles tanto para labores logísticas como operativas dentro de las Fuerzas Armadas.

## **5.2 Líneas futuras**

A raíz de las investigaciones realizadas durante la elaboración del trabajo y el proceso de recolección de información, se ha constatado la existencia de un abanico de materiales que pueden ser alternativas muy eficaces en protección balística.

Una propuesta para futuros estudios es, a partir de algunos de los conocimientos que este TFG ha tratado impartir, realizar los mismos estudios centrado en un solo tipo de material. Como por ejemplo realizar este proceso para materiales únicamente metálicos, o únicamente composites. De este modo se lograría realizar un análisis más en profundidad sobre las mejores alternativas para considerar en la protección balística y la defensa dentro de cada familia de materiales.

Otro punto interesante podría ser la aplicación de análisis dimensionales y numéricos para distintas situaciones, materiales, velocidades y calibres. De esta manera se pueden obtener resultados susceptibles de ser de gran importancia para la investigación e industria de defensa.

En cuanto a los procesos de selección multicriterio, la implementación de estos en tareas de planeamiento, los cuales, dependiendo del escenario en que se opere, son influidos por multitud de factores y en base a ellos hay que tomar una decisión. Por ello, el empleo de este tipo de herramientas puede aportar mucha seguridad y objetividad en el momento de tomar una decisión.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. S. Gálvez, *Materiales para la Defensa*, Madrid: Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de la
- [2] I. Alvarellos Pérez, *Modelo numérico para impactos de alta velocidad en blindajes cerámico/metálicos*
- [3] E. Alegre Carvajal, A. Perla de las Parras y J. López Díaz, «Técnicas y medios,» de *La materia del Ar*
- [4] «Batalla naval. Tácticas y combate naval en la era de la vela,» *Todo a babor*, [En línea]. Available: [h](#)  
[combate-naval-era-de-la-vela/](#). [Último acceso: 4 2 2020].
- [5] J. Potts, «FS La Glorie Ironclad- France Battleship,» *Military Factory*  
[https://www.militaryfactory.com/ships/detail.asp?ship\\_id=La-Gloire](https://www.militaryfactory.com/ships/detail.asp?ship_id=La-Gloire). [Último acceso: 4 2 2020].
- [6] E. McLaren, «Introducción: Crucero Acorazado,» *FDRA- Fuerza Naval*, 2017.
- [7] Definiciones-de.com, «Historia del blindaje (militar),» ALEGSA, 24 07 2015.  
[de.com/Definicion/de/historia\\_del\\_blindaje.php](#). [Último acceso: 5 2 2020].
- [8] P. P. R. Soriano, «El Bismarck. Operación Rheinübung,» *Asociación cultural albaceteña de recreación*
- [9] SSAB, «Armox-Armadura de acero ultraresistente-SSAB,» SSAB, [En línea]. Available: <https://www.>
- [10] MKU, «Protección balística naval,» MKU, [En línea]. Available: <https://www.mku.com/es/Sea-Protec>
- [11] DuPont, «Blindaje para vehículos-DuPont Kevlar,» DuPont, [En línea]. Available: [h](#)  
[proteccion/blindaje-para-vehiculos.html](#).
- [12] F. Matías, «El blindaje activo, su funcionamiento y tipos,» *Analizando Conflictos*, 2019.
- D. d. S. N. *Estrategia de Seguridad Marítima Nacional*, Gobierno de España, 2013.

[13]

«Tercer atentado contra buques de la Armada,» *El País*, 15 Mayo 1984.

[14]

M. d. D. «Ministerio de Defensa de España,» Gobierno  
[15] [https://www.defensa.gob.es/misiones/en\\_exterior/actuales/listado/atalanta.html](https://www.defensa.gob.es/misiones/en_exterior/actuales/listado/atalanta.html). [Último acceso: 22 2 2020]

[16]

H. Larraín Landaeta, Las amenazas asimétricas como una modalidad de resolución de conflictos, Revisión

[17]

F. Fernández Fadón, Piratería en Somalia: "mares fallidos" y consideraciones de la historia marítima, *Revista de Historia de la Defensa*, 2017.

[18]

S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Pearson Educación de México, 2009.

[19]

Los avances de la química y su impacto en la sociedad, Centro Superior de Investigación Científica, 2007.

[20]

J. Aznar Bellver y F. Guijarro Martínez, *Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio*, Valencia, 2008.

[21]

S. K. Omkarprasad S. Vaidya, *Analytic Hierarchy Process: An overview of applications*, European Journal of Operational Research, 2008.

[22]

N. Castrillo Boderó, *Implementación en Microsoft Excel ® de métodos de toma de decisión multicriterio*, Ingenierías Industriales, 2017.

[23]

C. L. «Aceros de Protección Antibalas MARS,» Industeel. Arcelor Mittal.

[24]

SSAB, «Acero de protección Ramor®,» 2014.

[25]

A. M. Díaz, *Modelización analítica del impacto de proyectiles rígidos sobre placas de aleaciones de aluminio*, 2012.

[26]

L. Santalla, «Teoría de construcción.net,» FLU-OR Arquitectura, 18 Febrero 2020. [En línea] [content/uploads/2012/04/foam-aluminium.gif](http://content/uploads/2012/04/foam-aluminium.gif).

[27]

F. Gálvez Díaz-Rubio, *Caracterización mecánica de materiales cerámicos avanzados a altas velocidades*, Madrid, 1999.

[28]

E. Medvedovski, «Ballistic performance of armour ceramics: Part 2,» de *Ceramics International*, Procedia Engineering, 2012.

[29]

I. Gago, M. del Río, J. Carretero, I. Ibarra, G. León y B. Miguel, «Nanocomposites reforzados con grafeno para blindaje personal,» VI Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, Cartagena. España, 2018.

[30]

«Desarrollan un material de blindaje para barcos frente a los ataques piratas,» *EFE Alicante*, 28 Abril 2018.

[31]

«MIL-STD-QQ85 (AT), MANUFACTURING PROCESS STANDARD: WELDING, HIGH HARDNESS STEEL, WROUGHT, HOMOGENEOUS (FOR USE IN ARMOR PLATE),» DEFENCE, 1973.

«MIL-A-12560H. ARMOR PLATE , STEEL, WROUGHT, HOMOGENEOUS (FOR USE IN ARMOR PLATE),» DEFENCE, 1973.

[32] TESTING),» Washinton: DEPARTMENT OF DEFENCE, 1990.

«Mil-A-46100D, MILITARY SPECIFICATON: ARMOR PLATE, STEEL, WROUGHT, HIC  
[33] DEFENCE, 2007.

J. Verdaasdonk, «The use of modern high strength steel grades in the Australian Air Warfare  
[34] Organisation, 2012.

L. D. Emily Frain, «The Effect of Weld Penetration on Blast Performance of Welded Panels,»  
[35] Organisation, Australian Government. Department of Defence, 2014.

ArcelorMittal, «Plate Specification Guide,» Indiana, EEUU , 2016.  
[36]

SSAB, «ARMOX ADVANCE,» 2014.  
[37]

M. y. V. A. aguna, «Estudio preliminar sobre la resistencia al impacto de un material multilaminar,» C  
[38]

C. Cerecedo Fernández, V. Valcárcel Juárez, R. Torrecillas San Millán, A. Fernández Valdés, S. River  
[39] monocristalinas de alúmina en cerámicas balísticas,» III Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad

F. G. DÍAZ-RUBIO, CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES AVANZADOS  
[40] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS,

ARMAT, «Vidrio Balístico ARMAT Plano,» 2013.  
[41]

ARMAT, «Aramida Balístico ARMAT,» 2013.  
[42]

ARMAT, «ARMAT – Telas de Aramida,» 2013.  
[43]

ECOTEXCOMP, «INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ESTRUCTURAS TEXTILES AP  
[44] COMPUESTOS DE CARACTER ECOLÓGICO,» Alicante, 2011.

C. K. Tae Jin Kang, «Energy-absorption mechanisms in Kevlar multiaxial warp-knit fabric composi  
[45] Sur, 1999.

I. C.R. Laurence Co., «CRL Panel de fibra de vidrio para protección niveles 1 ,2 y 3 H.P.S.A, de 9,5 m  
[46]

A. Inc., «Polietileno Balístico ARMAT (ABP),» 2013.  
[47]

UPCT, «Defensa destaca una investigación de la UPCT para mejorar los chalecos antibalas con grafeno  
[48]

I. Gago, «Un estudiante de la UPCT desarrolla materiales dopados con grafeno para buques más resist  
[49]

J. M. C. S. D. N. C. Y. Julián Portocarrero, «DESARROLLO DE PLACAS DE PROTECCIÓN E  
[50] SISTEMA MULTICAPAS PARA LA REDUCCIÓN DE PESO Y AUMENTO DE LAS PROPIEDAD  
*Edición Especial Artículos Cortos*, nº N. 5, pp. pp. 310-316.

- [51] G. B. Torres y J. M. V. Restrepo, «Fractografía y disipación de energía cinética en un panel balístico d metálico.,» Matéira (Río de Janeiro), Medellín, Colombia, 2013.
- [52] J. M. V. Julián Portocarrero Hermann, «SISTEMAS DE PROTECCIÓN BALÍSTICA BASADOS VIDRIO,» Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez”, Cali, Colombia, 2013.
- [53] M. A. M. AG CLARKE, «BALLASTIC PROTECTION FOR THE GUARDIA CIVIL SHIP RIO SEC
- [54] FIBROLUX, «Paneles balísticos de composite,» Hofheim - Wallau, Alemania, 2018.
- [55] G. B. Toskano Hurtado, «Cap. III Proceso de Análisis Jerárquico (AHP),» de *El proceso de Análisis decisiones en la selección de proveedores*, Tesis Digitales UNMSM, p. 21.
- [56] J. UPV. Aznar Bellver, «Youtube,» Universidad Politécnica de Valencia, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=SVivfG6Iaaw>.
- [57] «guiasjuridicas.es,» Wolters Kluwer, [En] <https://www.guiasjuridicas.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASMckhlQaptWmJOcSoAaW8jojUAAAA=WKE>.
- [58] Carrasco Pena, Pedro, Arce Fariña, Elena , Suárez García, Andrés y Álvarez Feijoo, Miguel Ángel, «A Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2019.
- [59] G. L. Lloyd's Register, «Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships,» de *Volume 1, Pa*
- [60] M. A. M. C. a. D. Systems, «TECHNICAL SOLUTION FOR THE GUARDIA CIVIL SHIP,» 2015.
- [61] NATO, ANEP-77. Naval Ship Code. Edition E Version 1, NATO STANDARDIZATION OFFICE (N
- [62] D. K. Brown, *Warrior to dreadnought: Warship design and developement 1860-1905*, 1997.
- [63] «Equipos Operativos de Seguridad (EOS) de Infantería de Marina, en primera línea,» *Defensa.com*, 20
- [64] «Los primeros navegantes de la historia,» *UQUAE Fundación*.
- [65] «‘Bismarck’, a pique el orgullo del Reich.,» *La Vanguardia* , 27 Mayo 2016.

## ANEXO I: ENCUESTAS REALIZADAS

En este anexo se adjuntan las encuestas realizadas para la obtención de información y opiniones necesarias para hacer uso de la herramienta AHP

### Materiales de Protección Balística

Esta encuesta está enfocada a recolectar distintas opiniones sobre los distintos materiales que se suelen emplear para hacer blindajes en los buques.

**\*Obligatorio**

Rellenar esta encuesta no le llevará más de 5 minutos. Para comenzar es necesario que antes rellene los siguientes campos:

¿Es usted civil o militar? \*

Civil

Militar

En caso de ser civil, ¿cuál de las siguientes ocupaciones está más relacionada con la que usted ejerce? (No conteste si no es civil)

Estudiante de Ingeniería o Arquitectura

Ingeniero Técnico Industrial (Mecánica, Química, etc.)

Ingeniero Naval

Otro: \_\_\_\_\_

En caso de ser de la Armada, ¿a qué cuerpo pertenece y cuál es su rango? (No conteste si no pertenece a la Armada)

	Cuerpo General	Infantería de Marina	Intendencia	Ingenieros
Coronel/Capitán de Navío	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teniente Coronel/Capitán de Fragata	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Comandante/Capitán de Corbeta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Capitán/Teniente de Navío	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teniente/Alférez de Navío	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Alférez/Alférez de Fragata	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Idoneidad de los Materiales

En esta primera sección de preguntas, se mostrarán distintos materiales que poseen propiedades concretas para desarrollar la función de blindaje.

En base a la naturaleza de estos materiales, se le pedirá que seleccione cuales cree que son más idóneos en términos de construcción naval y de protección balística.

A continuación se presenta una breve definición de cada uno de los materiales:

- **METALES:**  
Ventajas: elevada dureza y tenacidad, además de coste reducido. Al ser maleables, si reciben un impacto, se deforman y aumentan la superficie de contacto con el proyectil, lo que permite que puedan absorber múltiples impactos.  
Desventaja: elevado peso.
- **CERÁMICAS.**  
Ventajas: elevados módulo elástico y resistencia a compresión, además de un peso específico relativamente bajo.  
Desventajas: Debilidad ante esfuerzos de tracción y flexión, además de fragilidad.
- **POLÍMEROS.**  
Ventajas: Flexibles. Absorben la energía del proyectil y retienen o evitan las deformaciones que pudieran ocurrir en el impacto.  
Desventajas: Suelen ser de poca consistencia estructural, por lo que es necesario combinarlos con otros materiales que les otorguen una forma fija.
- **COMPOSITES.** Por último encontramos los compuestos de materiales (composites). Estos son el producto de la unión de varios materiales con características diferentes para formar otro material que reúna las propiedades que por separado no podría.  
Ventajas: Propiedades mecánicas mucho mayores a las de las materias primas de las que está formado, también son más ligeros.  
Desventajas: dificultad de obtención y coste más elevado que otros materiales.

¿Qué material considera más idóneo en protección ballística? \*

	1	2	3	4	5	
Metales	<input type="radio"/>	Cerámicas				

\*

	1	2	3	4	5	
Metales	<input type="radio"/>	Polímeros				

\*

	1	2	3	4	5	
Metales	<input type="radio"/>	Composites				

*	1	2	3	4	5	
Cerámicas	<input type="radio"/>	Composites				

*	1	2	3	4	5	
Polímeros	<input type="radio"/>	Cerámicas				

*	1	2	3	4	5	
Polímeros	<input type="radio"/>	Composites				

### Importancia de las Propiedades

En esta sección, tendrá que elegir cuál de las dos opciones que se le presentan es más relevante a la hora de elegir el material de blindaje para el buque.

Las variables que tendrá que escoger se corresponden con algunas de las características que debería reunir un material destinado a la protección balística. Estas son:

- **COSTE.** Fundamental para hacer una estimación de la viabilidad.
- **PESO.** Está estrechamente relacionado con el consumo del buque y con la estabilidad y maniobrabilidad de este.
- **RESISTENCIA ESTRUCTURAL.** Fundamental para el diseño y construcción de las estructuras del barco.
- **CALIDAD BALÍSTICA.** La capacidad del material para resistir impactos. Se encuentra relacionada con la dureza del material.

¿Qué considera más importante? \*

	1	2	3	4	5	
Un menor coste	<input type="radio"/>	Un menor peso				

\*

	1	2	3	4	5	
Un menor coste	<input type="radio"/>	Una mayor resistencia estructural				

*							
		1	2	3	4	5	
Un menor coste	<input type="radio"/>		Una mayor calidad balística				

*							
		1	2	3	4	5	
Un menor peso	<input type="radio"/>		Una mayor calidad balística				

*							
		1	2	3	4	5	
Un menor peso	<input type="radio"/>		Una mayor resistencia estructural				

*							
			1	2	3	4	5
Una mayor calidad balística	<input type="radio"/>		Una mayor resistencia estructural				

La siguiente encuesta es la que fue destinada solo a los expertos:

⋮					
Con respecto al COSTE, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales? *					
	Muy poco apro...	Poco apropiado	Sin influencia	Apropiado	Muy apropiado
Metales	<input type="radio"/>				
Cerámicas	<input type="radio"/>				
Polímeros	<input type="radio"/>				
Composites	<input type="radio"/>				

Con respecto al PESO, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales? *					
	Muy poco apro...	Poco apropiado	Sin influencia	Apropiado	Muy apropiado
Metales	<input type="radio"/>				
Cerámicas	<input type="radio"/>				
Polímeros	<input type="radio"/>				
Composites	<input type="radio"/>				

⋮

Con respecto a la RESISTENCIA ESTRUCTURAL, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales? \*

	Muy poco apro...	Poco apropiado	Sin influencia	Apropiado	Muy apropiado
Metales	<input type="radio"/>				
Cerámicas	<input type="radio"/>				
Polímeros	<input type="radio"/>				
Composites	<input type="radio"/>				

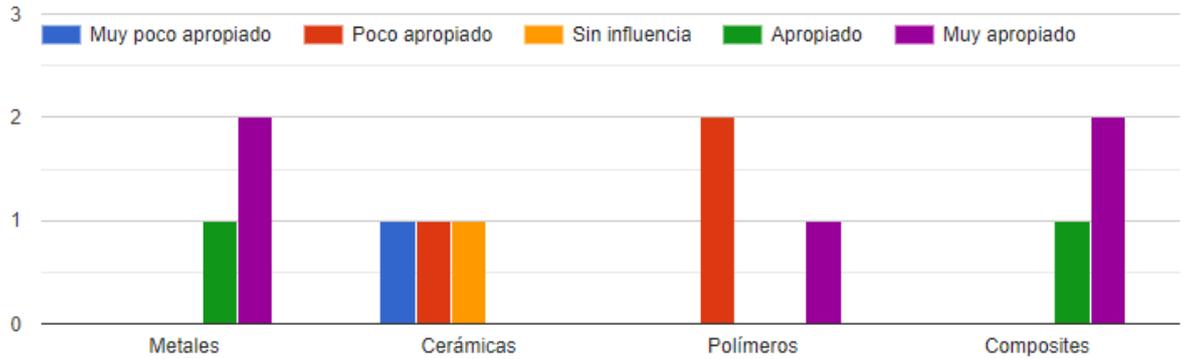
Con respecto a la CALIDAD BALÍSTICA, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales? \*

	Muy poco apro...	Poco apropiado	Sin influencia	Apropiado	Muy apropiado
Metales	<input type="radio"/>				
Cerámicas	<input type="radio"/>				
Polímeros	<input type="radio"/>				
Composites	<input type="radio"/>				

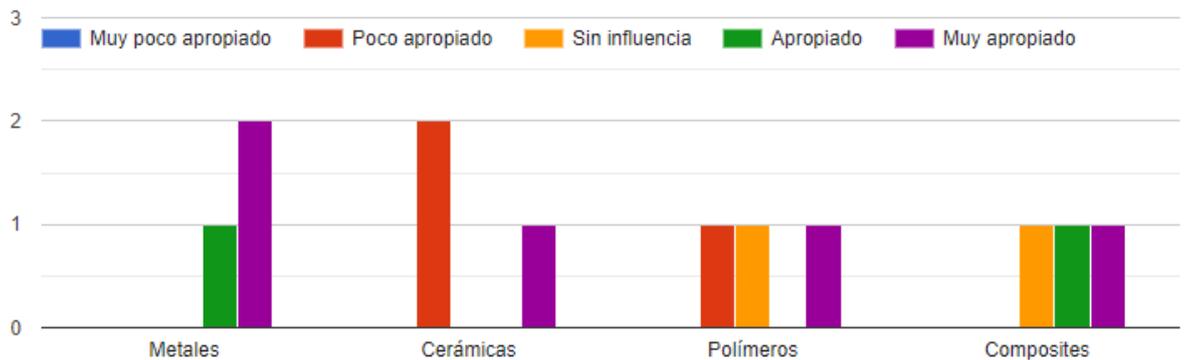
Y aquí se muestran los resultados de dicha encuesta:



Con respecto a la RESISTENCIA ESTRUCTURAL, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales?



Con respecto a la CALIDAD BALÍSTICA, ¿Cómo de apropiados considera a los siguientes materiales?



## ANEXO II: PLANTILLA DE EXCEL PARA AHP

Primero se muestran los cálculos para el estudio en conjunto (militares y civiles)

1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS		NO MODIFICAR CELDAS AMARILLAS!!!			
CRITERIOS	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA	VECTOR DE PRIORIDAD
COSTE	1,00	1,00	0,11	0,11	6,068%
PESO	1,00	1,00	0,20	0,20	6,553%
RESISTENCIA ESTRUCTURAL	9,00	5,00	1,00	1,00	43,689%
CALIDAD BALÍSTICA	9,00	5,00	1,00	1,00	43,689%
<b>SUMA</b>	20,000	12,000	2,311	2,311	100,000%
TOTAL	36,622				
$\lambda_{max}$	4,019417476				
CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,006472492			
RI (Índice aleatorio)	n= 4	0,882			
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI	0,73%	<9%		ACEPTABLE

2. COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS RESPECTO A LOS CRITERIOS					
1. COSTE	METALES	POLÍMEROS	CERÁMICAS	COMPOSITES	VECTOR DE PRIORIDAD
METALES	1,00	1,00	5,00	9,00	42,155%
POLÍMEROS	1,00	1,00	5,00	9,00	42,155%
CERÁMICAS	0,20	0,20	1,00	3,00	11,593%
COMPOSITES	0,11	0,11	0,33	1,00	4,098%
<b>SUMA</b>	2,311	2,311	11,333	22,000	100,000%
TOTAL	37,956				
$\lambda_{max}$	4,163934426				
CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,054644809			
RI (Índice aleatorio)	n= 4	0,882			
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI	6,20%	<9%		ACEPTABLE

2. PESO	METALES	POLÍMEROS	CERÁMICAS	COMPOSITES	VECTOR DE PRIORIDAD
METALES	1,00	0,20	1,00	0,11	5,702%
POLÍMEROS	5,00	1,00	9,00	1,00	39,474%
CERÁMICAS	1,00	0,11	1,00	0,11	5,482%
COMPOSITES	9,00	1,00	9,00	1,00	49,342%
<b>SUMA</b>	16,000	2,311	20,000	2,222	100,000%
TOTAL	40,533				
$\lambda_{max}$	4,01754386				
CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$		0,005847953		
RI (Índice aleatorio)	n= 4		0,882		
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI		0,66%	<9%	ACEPTABLE

3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL	METALES	POLÍMEROS	CERÁMICAS	COMPOSITES	VECTOR DE PRIORIDAD
METALES	1,00	9,00	5,00	3,00	55,939%
POLÍMEROS	0,11	1,00	1,00	0,20	7,182%
CERÁMICAS	0,20	1,00	1,00	0,33	7,873%
COMPOSITES	0,33	5,00	3,00	1,00	29,006%
<b>SUMA</b>	1,644	16,000	10,000	4,533	100,000%
TOTAL	32,178				
$\lambda_{max}$	4,171270718				
CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$		0,057090239		
RI (Índice aleatorio)	n= 4		0,882		
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI		6,47%	<9%	ACEPTABLE

4. CALIDAD BALÍSTICA	METALES	POLÍMEROS	CERÁMICAS	COMPOSITES	VECTOR DE PRIORIDAD
METALES	1,00	9,00	3,00	3,00	49,724%
POLÍMEROS	0,11	1,00	0,20	0,20	4,696%
CERÁMICAS	0,33	5,00	1,00	1,00	22,790%
COMPOSITES	0,33	5,00	1,00	1,00	22,790%
SUMA	1,778	20,000	5,200	5,200	100,000%
TOTAL	32,178				

$\lambda_{max}$  4,193370166

CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,064456722	
RI (Índice aleatorio)	n= 4	0,882	
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI	7,31%	<9% <b>ACEPTABLE</b>

### 3. MATRIZ DE PRIORIDAD GLOBAL

	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA		RESULTADO AHP
<b>PRIORIDAD</b>	6,068%	6,553%	43,689%	43,689%		
METALES	42,155%	5,702%	55,939%	49,724%	METALES	49,095%
POLÍMEROS	42,155%	39,474%	7,182%	4,696%	POLÍMEROS	10,334%
CERÁMICAS	11,593%	5,482%	7,873%	22,790%	CERÁMICAS	14,459%
COMPOSITES	4,098%	49,342%	29,006%	22,790%	COMPOSITES	26,111%
<b>TOTAL</b>	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%		

COSTISTENCIA GLOBAL	$\overline{CR} = \frac{\sum_i w_i CI_i}{\sum_i w_i RI_i} =$	$\frac{0,093827352}{2,236040266} =$	4%	<9% <b>ACEPTABLE</b>
---------------------	---	-------------------------------------	----	----------------------

Los cálculos relativos al personal militar:

1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS						NO MODIFICAR CELDAS AMARILLAS!!!					
CRITERIOS	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA	VECTOR DE PRIORIDAD						
COSTE	1,00	1,00	0,20	0,20	8,333%						
PESO	1,00	1,00	0,20	0,20	8,333%						
RESISTENCIA ESTRUCTURAL	5,00	5,00	1,00	1,00	41,667%						
CALIDAD BALÍSTICA	5,00	5,00	1,00	1,00	41,667%						
SUMA	12,000	12,000	2,400	2,400	100,000%						
TOTAL	28,800										
$\lambda_{max}$	4										
CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$		0								
RI (Índice aleatorio)	n= 4		0,882								
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI		0,00%		<9%	ACEPTABLE					

3. MATRIZ DE PRIORIDAD GLOBAL						
	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA		RESULTADO O AHP
PRIORIDAD	8,333%	8,333%	41,667%	41,667%		
METALES	42,155%	5,702%	55,939%	49,724%	METALES	48,014%
POLÍMEROS	42,155%	39,474%	7,182%	4,696%	POLÍMEROS	11,752%
CERÁMICAS	11,593%	5,482%	7,873%	22,790%	CERÁMICAS	14,199%
COMPOSITE S	4,098%	49,342%	29,006%	22,790%	COMPOSITE S	26,035%
TOTAL	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%		

COSTISTENCIA GLOBALA	$CR = \frac{\sum_i w_i CI_i}{\sum_i w_i RI_i} = \frac{0,08735486}{2,23604027} = 4\%$	<9%	ACEPTABLE
----------------------	--	-----	-----------

Cálculos del personal civil:

**1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS NO MODIFICAR CELDAS AMARILLAS!!!**

CRITERIOS	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA	VECTOR DE PRIORIDAD
COSTE	1,00	0,20	0,11	0,20	4,208%
PESO	5,00	1,00	0,20	0,20	17,822%
RESISTENCIA ESTRUCTURAL	9,00	5,00	1,00	1,00	44,554%
CALIDAD BALÍSTICA	5,00	5,00	1,00	1,00	33,416%
<b>SUMA</b>	20,000	11,200	2,311	2,400	100,000%
TOTAL	35,911				

$\lambda_{max}$  4,66930693

CI (Índice de consistencia)	$(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,22310231		
RI (Índice aleatorio)	n= 4	0,882		
CR (Cociente de consistencia)	CI/ RI	25,30%	<9%	NO ACEPTABLE

**3. MATRIZ DE PRIORIDAD GLOBAL**

	COSTE	PESO	RESISTENCIA ESTRUCTURAL	CALIDAD BALÍSTICA		
<b>PRIORIDAD</b>	4,208%	17,822%	44,554%	33,416%		<b>RESULTADO O AHP</b>
METALES	42,155%	5,702%	55,939%	49,724%	METALES	44,329%
POLÍMEROS	42,155%	39,474%	7,182%	4,696%	POLÍMEROS	13,578%
CERÁMICAS	11,593%	5,482%	7,873%	22,790%	CERÁMICAS	12,588%
COMPOSITE S	4,098%	49,342%	29,006%	22,790%	COMPOSITE S	29,505%
<b>TOTAL</b>	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%		

COSTISTENCIA GLOBAL	$CR = \frac{\sum_i w_i CI_i}{\sum_i w_i RI_i} = \frac{0,31045717}{2,23604027} = 14\%$	<9%	NO ACEPTABLE
---------------------	---	-----	--------------