



Trabajo Fin de Grado

Estudio para la mejora de materiales y equipos
empleados en fortificación

CAC ALBERTO JOSÉ ROMERO PÉREZ-CARRO

Director académico: CORONEL D. JOSÉ MANUEL VICENTE GASPAR

Director militar: CAPITÁN D. SANTIAGO CUBAS JIMENEZ

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2023



Agradecimientos

En primer lugar quisiera expresar mi gratitud a todo el personal del REI XI por su apoyo prestado durante mis prácticas de mando, siendo un ejemplo de profesionalidad y humildad en todo momento. Debo hacer especial mención al Capitán de Ingenieros D. Santiago Cubas Jiménez, que desde un primer momento se ha volcado tanto con mis prácticas como con la realización de mi TFG, estoy plenamente convencido de que sin él este trabajo no hubiera sido posible. Del mismo modo debo señalar y agradecer al Teniente de Ingenieros Ontalba y a la Teniente de Ingenieros González la paciencia y el trato que han tenido conmigo, han sido para mí sin lugar a dudas fiel reflejo del oficial que quiero llegar a ser el día de mañana.

Me gustaría también expresar mi gratitud al Coronel José Manuel Vicente Gaspar, quien a pesar de haber sido mi tutor Académico durante un corto periodo de tiempo, ha sabido indicarme y corregirme dedicándome tanto tiempo como he necesitado para finalmente llegar a desarrollar un trabajo en condiciones.

En última instancia quisiera agradecer a *Militas Dei* por ser un pilar fundamental en mi vida ayudándome a acercarme todos los días un poco más al Señor. Es por ello que me gustaría finalizar estos agradecimientos con una frase de un Teniente al que tengo gran aprecio:

“Quisiera empezar agradeciendo a Dios porque sin Él nada tiene sentido.” (Tte Gratal, 2022)



RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal el estudio para la mejora de materiales y equipos empleados en fortificación. Para llevar a cabo este cometido se han realizado los siguientes hitos:

En primer lugar, mediante estudio bibliográfico se ha determinado cuales son los medios de fortificación que emplean las Fuerzas Armadas en la actualidad. Se ha identificado que la principal limitación que estos poseen es su dependencia del terreno, ya que la mayoría de las obras requieren de la propia tierra excavada y/o de sacos terreros para su construcción. Esta dependencia muestra ser perjudicial debido a las características impuestas por el terreno, como la imposibilidad de obtener tierra en ciertos lugares o la escasa resistencia balística de los suelos.

Mediante una sesión de “brainstorming” llevada a cabo con diferentes expertos se ha concluido que la manera óptima para abordar las limitaciones identificadas es mediante la utilización de estructuras modulares prefabricadas en base a materiales compuestos. Para llevar a cabo esta tarea ha sido necesario seleccionar un material compuesto, diseñar un sistema de fortificación en base a ese material y comparar la eficacia del sistema de fortificación frente a los medios tradicionales.

Para la selección del material, se ha llevado a cabo un estudio de los principales materiales empleados en fortificación actual concluyendo en la selección de un “composite” laminar en base a Kevlar, resina y poliamida. Para comprobar la resistencia a impactos del mismo, se ha procedido a realizar una prueba balística sobre él, concluyendo que 3cm de espesor son suficientes para detener un cartucho de hasta 5,56x45 mm a una distancia de 25m.

Posteriormente, se ha procedido a diseñar un sistema de fortificación modular en base a este material teniendo en cuenta criterios de resistencia balística, versatilidad, adaptabilidad, simplicidad, facilidad de montaje, portabilidad y modularidad. Para el modelado de todas las piezas que lo componen se ha utilizado un software de diseño asistido por ordenador (CAD).

Finalmente, para probar la viabilidad de dicho sistema se ha diseñado una estructura empleada en fortificación en base al mismo y se ha realizado una comparativa mediante un "radar chart" con su homóloga construida empleando medios tradicionales. Esta comparativa ha probado que la estructura construida utilizando el sistema de fortificación modular en base al material compuesto diseñada en este trabajo es más eficaz que la estructura basada en materiales tradicionales; igualándola en resistencia balística y superándola ampliamente en términos de velocidad de montaje, horas de trabajo del personal implicado y adaptabilidad.

Este trabajo obtiene como conclusión que el empleo de un sistema modular en base a materiales compuestos se muestra como una opción óptima para superar las limitaciones que presentan los medios y equipos empleados actualmente en fortificación.

Palabras clave

Fortificación, modular, materiales compuestos, composite.



ABSTRACT

This academic work has the main objective of studying the improvement of materials and equipment used in fortification. To carry out this task, the following milestones have been achieved:

First, through a bibliographic study, it has been determined which means of fortification are currently employed by the Armed Forces. It has been identified that the main limitation of these means is their dependence on the terrain since most of the works require to excavate the terrain and/or sandbags for their construction. This dependence proves to be detrimental due to the characteristics imposed by the terrain, such as the impossibility of excavating in certain places or the low ballistic resistance of the ground.

Through a brainstorming session conducted with different experts, it has been concluded that the optimal way to address the identified limitations is by using prefabricated modular structures based on composite materials. To carry out this task, it was necessary to select a composite material, design a fortification system based on that material, and compare the effectiveness of the fortification system against traditional means.

For the material selection, a study of the main materials used in current fortification has been carried out, resulting in the selection of a laminar composite based on Kevlar, resin, and polyamide. To test its impact resistance, a ballistic test has been conducted, concluding that a thickness of 3cm is sufficient to stop a cartridge up to 5.56x45 mm.

Subsequently, a modular fortification system based on this material has been designed, taking into account criteria such as ballistic resistance, versatility, adaptability, simplicity, ease of assembly, portability, and modularity. Computer-aided design (CAD) software has been used for modeling all the components.

Finally, to test the viability of the system, a fortification structure based on it has been designed, and a comparison has been made using a "radar chart" with its traditional counterpart. This comparison has proven that the structure constructed using the modular fortification system based on composite material designed in this work is more effective than the structure based on traditional materials, matching it in terms of ballistic resistance and significantly surpassing it in terms of assembly speed, hours of work for the personnel involved, and adaptability.

This academic work concludes that the use of a modular system based on composite materials proves to be an optimal choice for overcoming the limitations presented by the current means and equipment employed in fortification.

KEYWORDS

Fortification, modular, composite materials, composite.



INDICE DE CONTENIDO

<i>Agradecimientos</i>	I
RESUMEN	II
Palabras clave	II
ABSTRACT	III
KEYWORDS	III
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	1
2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	1
2.2 METODOLOGÍA.....	3
3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	3
3.1 COMETIDOS DE INGENIEROS.....	3
3.2 ESTRUCTURA ORGÁNICA	5
3.3 ESTRUCTURA OPERATIVA	6
3.4 ESTUDIO DE LA FORTIFICACIÓN ACTUAL.....	7
3.5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	10
3.5.1 ANALISIS POR PARTE DE LAS FAS	10
3.5.2 ESTUDIOS DE OTROS PAISES MIEMBROS DE LA OTAN	12
4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	12
4.1 INTRODUCCIÓN	12



4.2 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE MATERIALES.....	15
4.2.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.....	15
4.2.2 PRUEBA BALÍSTICA.....	16
4.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE FORTIFICACIÓN EN BASE A PLACAS MODULARES.....	23
4.3.1 MÓDULO DE FORTIFICACIÓN BÁSICO	24
4.3.2 MÓDULO DE FORTIFICACIÓN COMPLEMENTARIO	28
4.4 APLICACIÓN Y COMPARATIVA DEL SISTEMA DE FORTIFICACIÓN DISEÑADO.....	29
5 CONCLUSIONES.....	31
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ANEXO I: PLANOS BANCO DE PLACAS.....	34
ANEXO II: PLACAS BALÍSTICAS.....	36
ANEXO III: PLANTILLA FICHA DE REGISTRO.....	38
ANEXO IV: FICHA DE REGISTRO RELLENA	39
ANEXO V: PLANOS SISTEMA DE FORTIFICACIÓN.....	40



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: BON de Zapadores	5
Figura 2: CIA de Zapadores Ligera.....	6
Figura 3: Estructura orgánica y operativa Fuente: (MADOC, 2021).....	7
Figura 4 :espesores de diversos materiales para la protección contra proyectiles de fusil y ametralladora hasta 400m de distancia. Fuente (MADOC, 2005 b).....	8
Figura 5: Resultados obtenidos en la parte experimental correspondiente al modelo no 7 (2 mm de espesor de acero AISI 1043 + 2mm de espesor Poliurea) Fuente: (Laguna Iglesias, 2018) 11	
Figura 6:Resultados y comparación entre los modelos no 1 y 2 (modelo de acero monolítico y modelo multicapa de acero y poliurea) Fuente: (Laguna Iglesias, 2018).....	11
Figura 7: Perspectiva isométrica del banco de pruebas Fuente: Elaboración propia	17
Figura 8: Banco de pruebas resultado final Fuente: Elaboración propia	18
Figura 9: Contraste placa rellena y hueca. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 10: Placa rellena. Fuente: elaboración propia	19
Figura 11: Orificios de entrada en placa rellena Fuente: Elaboración propia	21
Figura 12: Orificios de salida en la placa rellena Fuente: Elaboración propia	21
Figura 13: Orificios de entrada placa hueca Fuente: Elaboración propia	22
Figura 14: orificios de salida placa hueca Fuente: Elaboración propia	22
Figura 15: Placas acopladas Fuente: Elaboración propia	24
Figura 16: Placa isométrico Fuente: Elaboración propia	24
Figura 17: pieza estructural acoplada Fuente: Elaboración propia	26
Figura 18: pieza estructural Fuente: Elaboración propia	26
Figura 19: Elemento de fijación Fuente: Elaboración propia	27
Figura 20: Hendidura para elemento de fijación Fuente: Elaboración propia	27
Figura 21: Comparativa elemento de fijación simple y doble Fuente: Elaboración propia	28
Figura 22: Elemento de apuntalamiento Fuente: Elaboración propia	28



Figura 23: Elemento de apuntalamiento, ejemplo de uso Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 24: Garita en base a sacos Fuente: (Cosoy, 2016).....	29
Figura 25: Garita en base a sistema de fortificación Fuente: elaboración propia	29
Figura 26: Comparativa de garitas Fuente: Elaboración propia	30
Figura 27: CIA de Plana Mayor y Servicios Fuente: (MADOC, 2005 a).....	43
Figura 28: CIA de Máquinas Fuente: (MADOC, 2005 a)	43
Figura 29: Subgrupo Táctico de Infantería Fuente: (Academia de Infantería (ACINF), 2023) ...	44



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sesión de "brainstorming". Fuente: elaboración propia	13
Tabla 2: Propiedades, ventajas y desventajas de distintos materiales. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 3: Cálculo del peso de distintos materiales. Fuente: Elaboración propia.....	16
Tabla 4: Análisis prueba balística placa rellena Fuente: Elaboración propia.....	21
Tabla 5: Análisis prueba balística placa hueca Fuente: Elaboración propia	22
Tabla 6: Volúmenes de la placa Fuente: Elaboración propia	25
Tabla 7: Pesos de la placa Fuente: Elaboración propia	25
Tabla 8: Volúmenes pieza estructural Fuente: Elaboración propia	26
Tabla 9: Pesos pieza estructural Fuente: Elaboración propia	27



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AGM: Academia General Militar

BON: Batallón

CAC: Caballero Alférez Cadete

CAD: Diseño Asistido por Ordenador

CIA: Compañía

CUD: Centro Universitario de la Defensa

ET: Ejército de Tierra

EOD: Explosive Ordnance Disposal

FAS: Fuerzas Armadas

GT: Grupo Táctico

ISO: Organización Internacional de Estandarización

MADOC: Mando de Adiestramiento y Doctrina

MINISDEF: Ministerio de Defensa

NATO: North Atlantic Treaty Organization

ORTE: Organización del Terreno

OTAN: Organización del Tratado del Atlántico Norte

PLMS: Plana Mayor y Servicios

Scc: Sección

SG/T: Subgrupo Táctico

Sgto: Sargento

TFG: Trabajo de Fin de Grado

UME: Unidad Militar de emergencias





1 INTRODUCCIÓN

La presente memoria expone los resultados obtenidos durante la ejecución del trabajo de Fin de Grado en Ingeniería de Organización Industrial (perfil defensa) impartido por el Centro Universitario de la Defensa en la Academia General Militar (AGM). Esta investigación tiene como objetivo estudiar innovaciones en el campo de los materiales y medios utilizados en fortificación militar, alineadas con los intereses y necesidades poliorcéticas de las Fuerzas Armadas (FAS).

“La fortificación se define como el proceso que abarca la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras en instalaciones, las cuales incorporan medidas de protección tanto contra impactos balísticos como contra explosiones. El objetivo de la misma es hacer fuerte con obras de defensa un pueblo o sitio cualquiera, para que pueda resistir a los ataques del enemigo” (Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC), 2005). Por otro lado, dentro del Ámbito de la alianza Atlántica se considera como una de las tareas de Ingenieros que contribuyen a la supervivencia dentro del modelo de la OTAN de Protección de Fuerzas. (North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2015).

En la actualidad los materiales y medios más utilizados incluyen elementos como el hormigón, el acero, los sacos terreros, gaviones tipo HESCO y materiales prefabricados como los “T-WALLS”. Estas soluciones han demostrado ser eficaces en diversos escenarios, proporcionando la resistencia estructural y protección necesarios. No obstante, en los actuales Teatros de Operaciones híbridos a los que nos enfrentamos, donde las amenazas están en constante evolución, resulta imperativo que las FAS se adapten a este entorno con el objetivo de garantizar tanto la seguridad del personal militar como la efectividad en el cumplimiento de sus misiones.

En este contexto, los materiales compuestos emergen como una solución prometedora. Estos materiales se caracterizan por su versatilidad, que combina resistencia con ligereza, lo que les convierte en una opción atractiva para situaciones que requieran movilidad y una rápida capacidad de respuesta. Su beneficio también radica en la posibilidad de reducir tanto sus costes logísticos debido a su ligereza, un aspecto crítico en operaciones expedicionaria y despliegues en teatros distantes.

Es por ello que este trabajo se centrará en explorar el potencial de dichos materiales en el ámbito de la castrametación militar y su capacidad para satisfacer las cambiantes demandas de las FAS en un entorno operativo en constante evolución.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es llevar a cabo un estudio para la mejora de materiales y equipos empleados en fortificación. Este proyecto tiene como meta identificar, analizar y proponer mejoras significativas en los materiales y equipos actualmente utilizados, con el propósito de mejorar su eficacia, optimizar los recursos disponibles y aumentar la capacidad de adaptación de las posiciones defensivas ante amenazas actuales derivadas de un teatro de operaciones híbrido.



El objetivo principal, se alcanzará mediante la consecución de los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar la efectividad de los materiales y equipos actualmente empleados en fortificación para determinar áreas de mejora necesaria y asegurar una adaptación eficaz un teatro de operaciones en constante evolución.
2. Investigar y recopilar información sobre los materiales más utilizados en la actualidad y seleccionar un nuevo material compuesto en base a estos.
3. Evaluar la resistencia balística del nuevo material propuesto para resistir impactos balísticos, considerando su aptitud para resistir tanto amenazas tradicionales como emergentes en el entorno operativo actual.
4. Diseñar un sistema de fortificación en base a ese nuevo material, aprovechando sus propiedades.

Por otro lado, una de las claves del éxito para definir el resultado que se busca obtener radica en la claridad y la precisión en la definición de la finalidad y límites del proyecto. Dos conceptos esenciales en este contexto son el “alcance del producto” y el “alcance del proyecto”, siendo el primero las funciones y características que definen el producto mientras que el segundo engloba las actividades y tareas necesarias para ejecutarlo con éxito.

El alcance del producto de este trabajo involucra:

- Un material compuesto ligero, resistente, de coste asumible y gran protección balística.
- Un sistema de fortificación basado en materiales compuestos, siguiendo los principios de versatilidad, resistencia balística, diseño simple, facilidad de montaje, portabilidad y modulabilidad.
- Una estructura de fortificación en base al sistema de fortificación con características superiores a una estructura homóloga en base a materiales empleados en la actualidad.

Para poder completar el planteamiento del trabajo con las características descritas se precisa de la realización de las siguientes labores que delimitan el alcance del proyecto:

- Revisión del estado actual de los materiales y equipos de fortificación.
- Investigación de soluciones actuales disponibles para mejorar materiales y equipos.
- Selección de un material compuesto que pueda ser empleado en fortificación.
- Análisis balístico experimental del material compuesto mediante una prueba de resistencia balística.
- Diseño de un sistema de fortificación utilizando el “composite” como material de fabricación.
- Diseño de una estructura de fortificación utilizando el sistema de fortificación diseñado.
- Comparativa entre la estructura de fortificación diseñada y una similar construida utilizando materiales de uso mayoritario en la actualidad.



Tanto el diseño del sistema de fortificación como el de la estructura serán teóricos utilizando para los mismos un modelado computacional mediante un software de diseño de CAD. No obstante, el análisis balístico del material compuesto no se realizará empleando un software de análisis de elementos finitos sino que se llevará a cabo de manera física.

Los aspectos que no se abordan en este trabajo son los siguientes:

- Plan de transporte del sistema de fortificación.
- Estudio de los costes de producción del sistema de fortificación.
- Estudio acerca de las distintas aplicaciones del material compuesto no comprendidas dentro del marco de la fortificación militar.

2.2 METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo comprende:

Métodos cualitativos: en relación con esta clasificación se utilizan en este proyecto herramientas de revisión bibliográfica y “brainstorming” como herramientas de trabajo.

Métodos cuantitativos: se realizan dentro de esta categoría el análisis de resultados de las pruebas balísticas físicas, el modelado de piezas utilizando software de diseño asistido por ordenador y el análisis de datos utilizando un “radar chart”.

3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1 COMETIDOS DE INGENIEROS

“Ingenieros es por excelencia el arma del trabajo técnico y, por ende, especializado. Se define como ingenieros al conjunto tradicional de pequeñas unidades que desarrollan las misiones que son competencia de esta especialidad fundamental, así como a sus componentes

Las unidades de ingenieros favorecen la maniobra propia y dificultan la del enemigo mediante acciones conducentes a modificar las condiciones del terreno, realizando cometidos de apoyo a la movilidad, contramovilidad y protección.

Asimismo, contribuyen a proteger a las fuerzas propias construyendo y preparando obras de fortificación y a mantener o crear la infraestructura necesaria para la proyección y el sostenimiento de la fuerza. Estas tareas se engloban en las capacidades de apoyo general de ingenieros” (MADOC, 2016).

Así, podemos hablar de las siguientes misiones de ingenieros: apoyo a la movilidad, apoyo a la contramovilidad, apoyo a la protección y apoyo general de Ingenieros.



Apoyo a la movilidad

Es el conjunto de actividades orientadas a facilitar el movimiento de las fuerzas propias a la velocidad precisa para llegar en el momento oportuno al lugar conveniente, en condiciones de cumplir su misión. La movilidad es necesaria para llevar a cabo todos los movimientos tácticos y logísticos, y estará afectada por el terreno, las condiciones meteorológicas y las actividades del enemigo.

Sus cometidos principales son: paso de cortaduras, acciones contraobstáculos, comunicaciones, apoyo a los elementos aéreos avanzados, gestión de la amenaza explosiva, limpieza de rutas, búsqueda militar y reconocimiento de ingenieros (MADOC, 2016).

Apoyo a la contramovilidad

Es el conjunto de actividades dirigidas a dificultar el libre uso del terreno por parte del enemigo, con objeto de desarticular sus planes, reteniéndole o canalizándole donde pueda ser batido para neutralizar o destruir su capacidad de combate.

Sus cometidos principales son la creación de obstrucciones y la mejora de obstrucciones permanentes (MADOC, 2016).

Apoyo a la protección

Es el conjunto de actividades dirigidas en última instancia a incrementar la seguridad y la capacidad de actuación preservando al personal, armamento, material, instalaciones e información, así como la imagen de la fuerza, de los efectos de las actividades adversarias, propias, y de las derivadas de riesgos sanitarios, medioambientales o accidentes debidos a causas diversas.

Sus cometidos principales son: apoyo al despeje de campos de tiro; asesoramiento para la selección de edificaciones o, en su caso, construcción de infraestructuras para su empleo como elementos de vida, de mando, logísticos y de protección; apoyo y ejecución de las medidas de enmascaramiento, ocultación y decepción no electrónica; y, apoyo para la preparación y construcción de fortificaciones (MADOC, 2016).

Apoyo general de Ingenieros

Es el conjunto de actividades que realizan los ingenieros para mantener, adecuar y, en su caso, crear la infraestructura necesaria para la proyección y el sostenimiento de la fuerza en el teatro de operaciones.

Sus cometidos principales son: explotación de transporte por ferrocarril; habilitación, mantenimiento y, en su caso, construcción de infraestructura vertical necesaria; captación, depuración/potabilización de agua e infraestructura necesaria; suministro de energía eléctrica y alumbrado; instalación y mantenimiento de redes de oleoductos; habilitación, mantenimiento y, en su caso, construcción de instalaciones de apoyo al despliegue aéreo; LOC; eliminación de amenazas explosivas (EOD); y apoyo a operaciones en zonas de agua, incluyendo instalaciones portuarias, actividades subacuáticas y vías navegable (MADOC, 2016).



3.2 ESTRUCTURA ORGÁNICA

“La estructura orgánica es la organización responsable de la preparación de la fuerza y de aportar las capacidades específicas a la estructura operativa mediante un acto de transferencia” (MADOC, 2021). Las unidades de Ingenieros se encuadran en la estructura orgánica dentro de diversas unidades u órganos dependiendo de sus cometidos. Para definir quien utilizaría las mejoras propuestas en este Trabajo de Fin de Grado, es imperativo primero describir la orgánica de un batallón de Zapadores de una Brigada Ligera. “El batallón, como unidad fundamental de empleo, dispone de capacidad de planeamiento, material en dotación y capacidad para asumir varios esfuerzos. Su potencia de trabajo se la proporciona la actuación coordinada de sus unidades y la dotación de material y equipo” (MADOC, 2016).

Su composición atiende a los siguientes criterios generales:

1. Se organizará normalmente en compañía de plana mayor y servicios, compañías homogéneas de zapadores y estará reforzado con su compañía de apoyo.
2. En el caso de los ingenieros de la brigada, los orgánicos y los que reciban como refuerzo del escalón superior, se articularán en núcleos para el apoyo a los grupos tácticos (GT) que materialicen los esfuerzos de la brigada, produciéndose una gran descentralización.
3. Tiene capacidad logística para suministrar a sus compañías y mantener toda la herramienta y maquinaria del batallón.

Así pues, según las orientaciones del manual OR4-402 Orientaciones Batallón de Zapadores (MADOC, 2005 a), la estructura orgánica del mismo (figura 1) se compone de:

- 1 CIA de Plana Mayor y Servicios (PLMS). (anexo VI)
- 1 CIA de Máquinas. (anexo VI)
- 3 CIAs de Zapadores Ligeras. (figura 2)

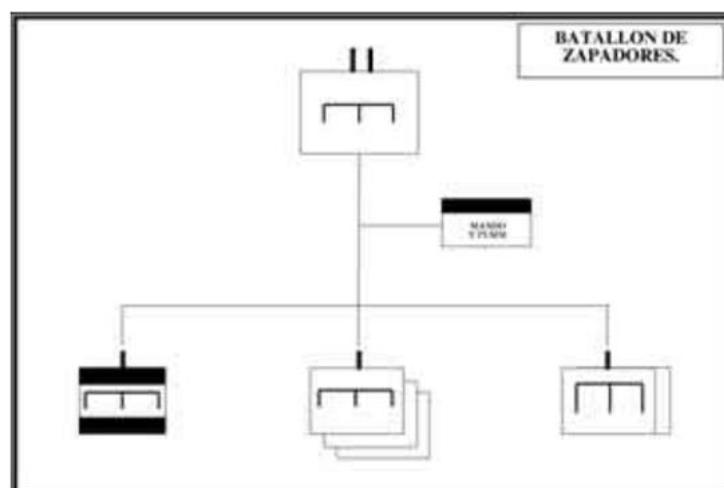


Figura 1: BON de Zapadores

Fuente: (MADOC, 2005 a)



La propuesta de empleo de los materiales y medios de este proyecto, estarán enfocados como un complemento al lote de una sección encuadrada en una CIA de Zapadores Ligera (figura 2).

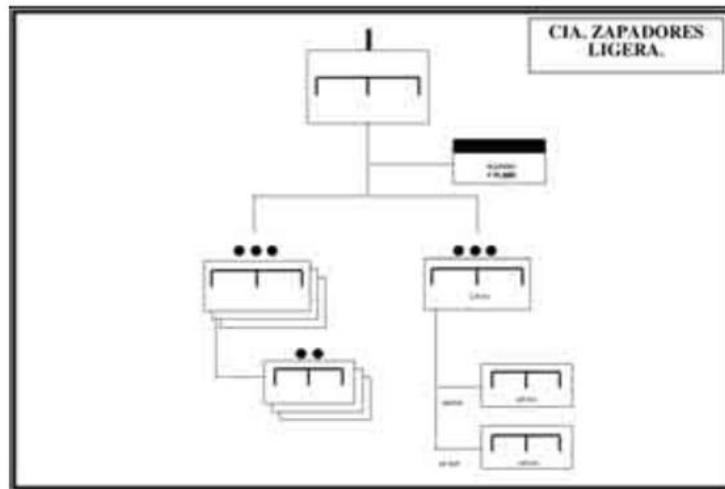


Figura 2: CIA de Zapadores Ligera

Fuente: (MADOC, 2005 a)

3.3 ESTRUCTURA OPERATIVA

“La estructura operativa es la responsable del desarrollo de la acción conjunta y combinada y dispuesta para el empleo de la Fuerza en operaciones, para el cumplimiento de las misiones asignadas a las Fuerzas Armadas” (MADOC, 2021).

Las organizaciones operativas que se constituyen a partir de los mandos se denominan mandos operativos; las que se constituyen sobre la base de grandes unidades orgánicas se denominan fuerzas operativas, y las que lo hacen sobre la base de pequeñas unidades orgánicas se conocen como agrupamientos tácticos. A continuación, en la figura 3, se relacionan los tipos de organizaciones operativas generadas a partir de los mandos, las grandes unidades y las pequeñas unidades.

En este contexto, se define un Grupo Táctico (GT) como “un agrupamiento táctico normalmente interarmas sobre la base de un batallón o grupo, constituido con los elementos de mando, combate, apoyo al combate, apoyo logístico al combate y capacitadores necesarios” (MADOC, 2021) y a un Subgrupo Táctico (S/GT) como “un agrupamiento táctico normalmente interarmas sobre la base de una compañía o batería con los elementos de mando, combate, apoyos y capacitadores necesarios” (MADOC, 2021).

La propuesta de empleo de los materiales y medios de este proyecto, estarán enfocados como un complemento al lote de una sección de Zapadores encuadrada en un Subgrupo Táctico en base a una CIA de Infantería Ligera (Anexo VI).



ESTRUCTURA ORGÁNICA		ESTRUCTURA OPERATIVA	
Categoría	Tipo de unidad	Tipo de organización operativa	Denominación
Mandos	Mando, Fuerzas, Cuartel General o Comandancia	Mando operativo y fuerza operativa	
Grandes unidades	Cuerpo de Ejército	Fuerza operativa	Cuerpo de ejército
	División		División
	Brigada		Brigada de combate
Pequeñas unidades	Regimiento	Agrupamiento táctico	Agrupación táctica
	Batallón/Grupo		Grupo táctico
	Compañía/Escuadrón		Subgrupo táctico/Partida
	Sección		Patrulla

Figura 3: Estructura orgánica y operativa

Fuente: (MADOC, 2021)

3.4 ESTUDIO DE LA FORTIFICACIÓN ACTUAL

“La fortificación consiste en la modificación de las características del terreno y de las condiciones en que puede ser utilizado, para proteger las tropas propias de los efectos del enemigo y en su caso la mejora de las condiciones de vida” (MADOC, 2005 b). El incremento en variedad y potencia de los medios de destrucción clásicos y la aparición de las armas nucleares tácticas han revalorizado el papel de la fortificación en el combate moderno. La protección pasiva que ofrecen los trabajos de fortificación de campaña permite reducir considerablemente los efectos de estas armas. (MADOC, 2005 b).

Las obras de fortificación consideradas como más utilizadas según la doctrina del ET son las siguientes:

- Asentamientos de armas.
- Depósitos de municiones.
- Abrigos para Puestos de Mando.
- Abrigos para órganos sanitarios.
- Zanjas para protección de personal.
- Fosos para protección de vehículos.
- Abrigos de asentamiento.
- Abrigos de descanso.



La mayoría de estas obras requieren de la propia tierra excavada de la posición y/o de sacos terrosos para su construcción, por consiguiente, están ampliamente supeditadas al terreno en el que se determine construirlas. Esta dependencia, ha demostrado en diversas ocasiones ser perjudicial debido a las limitaciones impuestas por las características del terreno, como la imposibilidad de conseguir tierra en ciertos lugares (combate en zonas urbanas) y la vulnerabilidad de algunos materiales utilizados como la nieve (figura 4), que puede ser penetrada fácilmente por los proyectiles, comprometiendo la seguridad de las estructuras y la protección de quienes las ocupan.

Materiales	Espesor (en m)	Observaciones
Paja.....	5,00	
Nieve fresca.....	3,00	
Nieve helada.....	1,50	
Turba	1,10	
Tepes.....	0,80	
Madera de pino.....	0,65	
Madera de encina	0,55	
Tierra húmeda.....	0,55 a 0,60	
Tierra seca	0,50	
Arena seca, en saco	0,40	
Mampostería, ladrillo	0,30	
Palastro de hierro.....	0,015	
Palastro de acero	0,012	

*Figura 4 :espesores de diversos materiales para la protección contra proyectiles de fusil y ametralladora hasta 400m de distancia.
Fuente (MADOC, 2005 b)*

Además, la excavación y la preparación de los sacos implica un esfuerzo físico significativo por parte de los soldados y consume un tiempo considerable que podría por otro lado ser destinado a otras tareas de mayor utilidad.

A lo largo de la historia de la guerra, la elección del lugar donde se libran las batallas ha sido crucial para el resultado de los conflictos. Si bien los campos de batalla pueden variar en cuanto a geografía y entorno, dos tipos de ubicaciones estratégicas se destacan por su frecuencia y su impacto en los enfrentamientos militares: las avenidas de aproximación y los núcleos de población. Estas ubicaciones tienen un profundo impacto en la dinámica de la guerra debido a la presencia de vías de comunicación en el primer caso, y núcleos industriales en el segundo. Estos puntos estratégicos, presentan un desafío constante para la construcción de elementos de fortificación efectivos. La falta de acceso a materiales como la tierra necesaria para fortificar y la imposibilidad de realizar excavaciones con medios expeditos en entornos urbanos, añaden una complejidad adicional a la tarea de establecer unas defensas sólidas en estas zonas críticas. Diversos ejemplos históricos ilustran este problema:

Batalla de las Ardenas

La Batalla de las Ardenas, tuvo lugar durante la Segunda Guerra Mundial, entre el 16 de diciembre de 1944 y el 25 de enero de 1945. El objetivo del Ejército Alemán era tomar el puerto de Amberes y así cortar las líneas de suministro aliadas. Los alemanes avanzaron a través de los densos bosques de las Ardenas, un área que los aliados consideraban poco probable para una ofensiva de gran envergadura debido a las difíciles condiciones geográficas. El fracaso



alemán se vio condicionado por diversos factores, un terreno difícil, la escasez de combustible y la carencia de medios de fortificación. Al ser una región montañosa y boscosa, con un suelo congelado durante el invierno, resultó imposible la excavación de unas posiciones defensivas profundas y eficaces. Esta batalla fue muy perjudicial para los alemanes, ya que los aliados lograron resistir y contraatacar, acelerando el colapso del Tercer Reich (Bergström, 2016).

Batalla de Brunete

La Batalla de Brunete, que tuvo lugar entre el 6 y el 25 de julio de 1937 durante la Guerra Civil Española, consistió en una serie de operaciones en la zona oeste de Madrid. El objetivo principal de esta ofensiva, liderada por el Ejército Republicano, era reducir la presión ejercida por las fuerzas nacionales en Madrid y aliviar la situación en el frente norte.

A pesar de un comienzo exitoso donde las fuerzas republicanas lograron avanzar en territorio enemigo, la ofensiva perdió impulso después de algunos días, y el ejército republicano se vio obligado a establecerse en defensiva. Durante la fortificación, se enfrentaron a problemas para establecer sus posiciones defensivas debido principalmente al terreno. La región de alrededor de Brunete presentaba una topografía con suelos rocosos y montañosos que dificultaban la excavación de trincheras profundas y eficaces. Esto dejó a las fuerzas republicanas con posiciones defensivas poco sólidas.

Esta falta de capacidad para fortificar adecuadamente tuvo un impacto importante en el desarrollo de la batalla. En respuesta, el general Franco detuvo su propia ofensiva en el norte y envió refuerzos al frente central para lanzar una contraofensiva y recuperar el terreno perdido. Después de una semana de combates intensos, el Ejército Nacional logró retomar la mayor parte del territorio que había cedido inicialmente (Quintana Jato, 2007).

En conclusión, tanto en la Batalla de las Ardenas durante la Segunda Guerra Mundial como en la Batalla de Brunete durante la Guerra Civil Española, la falta de capacidad para fortificar adecuadamente las posiciones defensivas representó un problema significativo, y estos no son casos aislados. La historia militar está llena de ejemplos similares en los que las condiciones del terreno y la disponibilidad de materiales complicaron la construcción de defensas sólidas.

En este contexto, la introducción de estructuras prefabricadas basadas en materiales compuestos podría haber proporcionado soluciones efectivas a estos problemas. Estas estructuras podrían haberse diseñado y producido de antemano, lo que habría eliminado la necesidad de realizar excavaciones en el terreno, reduciendo así el esfuerzo físico de los soldados y el tiempo necesario para construir las defensas.

Cabe destacar que el uso de material prefabricado para su empleo en fortificación ya ha sido utilizado con éxito a lo largo de la historia. Durante la conquista de Melilla en 1497, una vez que la ciudad fue tomada, se iniciaron trabajos de fortificación y construcción de estructuras defensivas para consolidar el control sobre la misma. Para ello se transportaron tablas de madera y otros elementos de construcción por mar, aprovechando la posición costera de la ciudad (Gutiérrez Cruz, 1993).



3.5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Para realizar un análisis del proyecto es necesario conocer su estado del arte. Para adquirir un conocimiento detallado de la investigación acerca de los materiales compuestos, se debe averiguar que estudios se están llevando a cabo tanto por parte de las FAS como por parte de países aliados pertenecientes a la OTAN.

3.5.1 ANALISIS POR PARTE DE LAS FAS

La aplicación de materiales compuestos en el ámbito militar es un campo de estudio y desarrollo que ha cobrado una importancia creciente a nivel internacional en las últimas décadas. A pesar de que en otros países se han llevado a cabo investigaciones extensas y se han desarrollado con éxito aplicaciones militares basadas en materiales compuestos, en el contexto español este enfoque aún está en una etapa incipiente. Las Fuerzas Armadas españolas tienen el potencial de beneficiarse significativamente de las propiedades avanzadas de estos materiales en términos de reducción de peso, aumento de resistencia y mayor durabilidad, pero hasta la fecha, las investigaciones y desarrollos específicos en este campo han sido limitados. Pese a la escasez de estudios, destaca un artículo publicado por la Escuela Superior de Ingenieros de Armas Navales en su Boletín Técnico de Ingeniería. El trabajo cuyo título es *"ESTUDIOS DE SIMULACIÓN Y DE CAMPO DE LA INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA BALÍSTICA DE ACERO TRATADO CON POLIUREA"* (Laguna Iglesias, 2018) se resume a continuación:

El proyecto se enfoca en investigar cómo la aplicación de poliurea como recubrimiento en acero influye en su resistencia balística, con la finalidad de desarrollar un material compuesto multilaminar heterogéneo. El estudio se basa en una revisión bibliográfica, análisis numéricos utilizando el software ABAQUS/Explicit y ensayos balísticos realizados en un Polígono de Experiencias.

El código de elementos finitos ABAQUS/Explicit se utilizó para predecir las respuestas dinámicas del material compuesto ante diversas cargas. El conocimiento reunido de los materiales involucrados, junto con la bibliografía consultada, sirvió como base para diseñar y fabricar varios modelos de blindajes

La parte experimental involucró la preparación de probetas para ensayos balísticos, con el propósito de investigar cómo los diferentes modelos respondían ante impactos a alta velocidad y examinar las respuestas de las placas de acero recubiertas de poliurea. Se analizaron factores como el espesor de la poliurea, la ubicación del recubrimiento en relación con la carga y las fuerzas de unión entre la poliurea y el acero bajo impacto balístico. Los resultados experimentales se compararon con los resultados numéricos (figura 5).

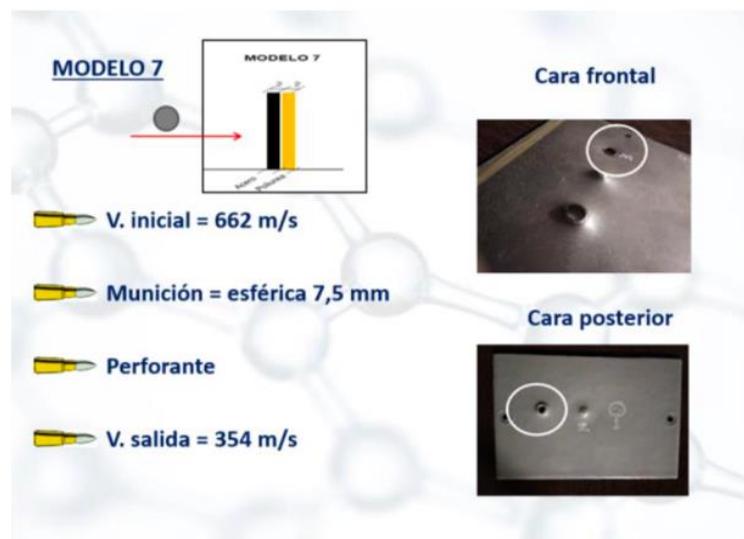


Figura 5: Resultados obtenidos en la parte experimental correspondiente al modelo no 7 (2 mm de espesor de acero AISI 1043 + 2mm de espesor Poliurea)
Fuente: (Laguna Iglesias, 2018)

Finalmente, los resultados del estudio indican que el uso de la poliurea como material de refuerzo en acero en un material multilaminar posee una gran capacidad de resistencia al impacto. Comparando un material formado por acero frente al acero multilaminar con poliurea, se obtiene una resistencia al impacto prácticamente idéntica habiendo reducido en un gran porcentaje del peso con respecto al material de partida (figura 6).

(12 mm) $V_0 \approx 800 \text{ m/s}$		MODELO 1	MODELO 2
Peso		Materiales 	Materiales $\downarrow 28,3 \%$
Penetración		Profundidad del orificio $\approx 7 \text{ mm}$ Deformación de la chapa en su parte posterior $1,2 \text{ mm}$	Profundidad del orificio $\approx 8 \text{ mm}$ Deformación de la chapa en su parte posterior $1,8 \text{ mm}$
Perforación		NO	NO
Sellado		NO	SI
Resistencia (F_r) ⁷		$\approx 78 \times 10^3 \text{ N}$	$\approx 74 \times 10^3 \text{ N}$

Figura 6: Resultados y comparación entre los modelos no 1 y 2 (modelo de acero monolítico y modelo multicapa de acero y poliurea)
Fuente: (Laguna Iglesias, 2018)



3.5.2 ESTUDIOS DE OTROS PAISES MIEMBROS DE LA OTAN

A nivel internacional, la investigación acerca de los materiales compuestos es avanzada. Destaca Estados Unidos, que no solo posee una gran variedad de estudios acerca del tema, sino que también han sido publicados un gran número de libros que resumen sus propiedades e indican la manera de utilizarlos. Entre todos ellos destacan y son relevantes para la realización del trabajo los siguientes:

Lightweight Ballistic Composites Military and Law Enforced Applications (Bhatnagar, 2016): centrado en el estudio y desarrollo de materiales compuestos balísticos ligeros y su aplicación en contextos tanto militares como policiales. Explora cómo estos materiales avanzados pueden ser utilizados para fabricar equipos de protección personal, vehículos blindados y otros dispositivos para aumentar la seguridad y la eficiencia en situaciones donde la protección balística es fundamental.

Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites (Uddin, 2010): se enfoca en la protección contra explosiones de infraestructuras civiles y vehículos mediante el uso de materiales compuestos. El libro examina cómo dichos materiales pueden ser empleados para aumentar la resistencia y seguridad de edificios, puentes, aeropuertos, y vehículos frente a amenazas explosivas como bombas o explosiones accidentales. Ofrece una visión detallada de investigaciones, técnicas de diseño y aplicaciones prácticas para reducir el impacto de las explosiones en entornos civiles.

Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection (Chen, 2016): orientado al estudio de materiales basados en fibras artificiales y su aplicación en la protección balística. Examina cómo estos materiales se utilizan para fabricar prendas de protección personal, vehículos blindados, cascos y otros equipos destinados a proteger a las personas y medios contra amenazas balísticas.

Fatigue of textile composites (Carvelli & Lovmov, 2015): estudia el desgaste en materiales compuestos en base a fibras textiles. Examina cómo estos materiales, impregnados con matrices poliméricas u otros materiales, responden a las tensiones cíclicas y al desgaste continuo a lo largo del tiempo.

4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

FICHA ENTREVISTA: “SESIÓN DE BRAINSTORMING”	
Estudio para la mejora de medios y materiales empleados en fortificación	
Fecha	20/9/23
Lugar	Cuartel General Arroquia
Objetivo	Evaluar cómo podrían los materiales compuestos solucionar las limitaciones que presenta la fortificación actual



INTEGRANTES				
	Empleo	Años de servicio	Destinos Relacionados	Cursos/estudios relacionados
Integrante 1	Capitán	12	UME, REI 11	Grado en ingeniería industrial
Integrante 2	Capitán	8	REI XI	Curso de vías, grado en ingeniería civil, master en ingeniería de materiales
Integrante 2	Teniente	5	REI XI	Arquitectura técnica + grado en ingeniería industrial
Integrante 3	Brigada	16	REI XI	Técnico Superior en Proyectos de Obra Civil:
Integrante 4	Sgto. Primero	14	REI XI	Técnico Superior en Desarrollo y Aplicación de Proyectos de Construcción

Tabla 1: Sesión de "brainstorming".

Fuente: elaboración propia

Una vez identificadas las limitaciones actuales en la fortificación, específicamente en la aplicación de materiales y medios expeditos en zonas poco óptimas para el uso de los mismos principalmente limitados por el terreno y el tiempo, surge el interrogante de cómo podemos mejorar y adaptar nuestros métodos para satisfacer estas necesidades. A través de un proceso de lluvia de ideas exhaustivo, se han evaluado distintas alternativas disponibles para abordar estos requerimientos de manera efectiva. Se ha concluido que la manera más óptima de abordar los diversos problemas a los que se enfrentan los medios de fortificación actuales es mediante la utilización de estructuras modulares prefabricadas en base a materiales compuestos.

La etapa inicial implica la evaluación de las necesidades presentes que se pretenden abordar. Resalta la importancia de comprender tanto las tendencias actuales de fortificación como las futuras para ajustar el proyecto en consecuencia. Asimismo, también es de gran importancia adaptar esas necesidades no suplidas en la fortificación de la forma más óptima y simple posible, a través de un uso de materiales polivalentes con diversas configuraciones modulares que supongan una mínima carga logística y que puedan ser económicamente viables en un futuro.

Tomando en cuenta las sugerencias generadas durante el proceso de lluvia de ideas, se procede a construir la definición y descripción detallada del trabajo que se llevará a cabo para conseguir abordar este propósito. El proyecto del diseño de placas modulares prefabricadas en base a materiales compuestos debe plantearse como un enfoque multidisciplinario que involucre ingeniería estructural, el diseño de materiales, la logística y la facilidad de montaje. El objetivo principal de este proyecto es investigar acerca de un material compuesto y desarrollar un sistema modular en base a este que cumpla con los siguientes criterios:



- **Versatilidad y adaptabilidad:** las placas presentes en la estructura deben ser diseñadas de manera que puedan adaptarse a diversas configuraciones de estructuras de fortificación, lo que incluye asentamientos de armas, garitas, abrigos para puestos de mando y otras aplicaciones similares.
- **Resistencia balística:** el material compuesto utilizado en la fabricación de placas debe proporcionar una resistencia comparable a los materiales actuales empleados en fortificación expedita.
- **Diseño simple:** el diseño de los paneles debe ser sencillo y eficiente, lo cual no solo facilita la fabricación, sino que también permite una fácil instalación y desmontaje.
- **Facilidad de montaje:** el sistema debe permitir a personal no especializado como una Scc de Zapadores ensamblar las placas de manera rápida y segura, lo cual permitirá una pronta respuesta a amenazas propias de un entorno híbrido.
- **Adaptabilidad a estructuras existentes:** el sistema debe ser diseñado de tal manera que pueda complementar y mejorar las estructuras ya existentes, en lugar de requerir la construcción de nuevas estructuras desde cero, este apartado es especialmente relevante en escenarios de combate en zonas urbanas.
- **Portabilidad:** el diseño de los diversos elementos debe ser lo más ligero y compacto posible, de tal manera que cada elemento individual tenga la capacidad de ser transportado por un solo combatiente.
- **Modularidad:** el sistema debe ser lo más modular posible facilitando así la reposición de los elementos dañados.

El proceso para que el sistema cumpla con los requisitos mencionados involucra una serie de etapas interconectadas:

- **Investigación y selección de materiales:** en esta fase inicial se analizarán diversos materiales disponibles en el mercado. El objetivo principal es identificar el material adecuado que cumpla con los requisitos de resistencia, durabilidad y portabilidad necesarios. Este estudio abarcará una revisión de los aspectos técnicos del material, y una prueba balística para evaluar la capacidad real del material para resistir impactos de los cartuchos más utilizados en la actualidad.
- **Diseño del sistema de placas modulares:** la optimización de la forma y el tamaño de las placas se centrará en lograr la máxima ligereza y compactibilidad. Esto es esencial para asegurar que las placas sean altamente portátiles y fáciles de manejar sin necesidad de medios adicionales. Estas características permitirán su aplicación eficaz en una amplia variedad de configuraciones en estructuras de fortificación facilitando cambios rápidos y sencillos en la disposición de las placas en respuesta a las necesidades cambiantes propias de los teatros de operaciones actuales.
- **Diseño de estructuras aplicando el sistema:** tras el diseño del sistema se procederá a modelar una estructura en base a las placas modulares y compararla con su homóloga fabricada en base a materiales tradicionales.



4.2 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DE MATERIALES

4.2.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

El proceso de selección de los materiales se trata de una etapa crítica en el desarrollo del proyecto; estos deben cumplir con unos estándares rigurosos de resistencia, durabilidad y versatilidad; sumado a ello deben ser moderadamente accesibles para que el estudio en si se pueda llevar a cabo. En este contexto, se ha realizado un meticuloso proceso de selección de los materiales más utilizados en el mercado para propósitos similares reflejados en la tabla 2.

MATERIAL	PROPIEDADES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Resina	Unión y consolidación	Ligereza, adaptabilidad	Menor resistencia a impactos
Kevlar	Resistencia balística	Ligereza, flexibilidad, adaptabilidad, resistencia a impactos	Coste
Aluminio	Resistencia/peso	Ligereza	Mayor peso que la resina
Acero	Resistencia, durabilidad	Gran resistencia a impactos	Peso muy significativo
Fibra de Carbono	Resistencia/peso	Mayor resistencia estructural que el Kevlar	Menor resistencia a impactos balísticos que el Kevlar
Materiales cerámicos	Resistencia balística	Gran resistencia a impactos	Elevado peso
Poliamida	Ligereza	Resistencia mecánica	Degradación térmica

Tabla 2: Propiedades, ventajas y desventajas de distintos materiales.

Fuente: Elaboración propia.

Las placas balísticas y sus piezas complementarias deben de estar formadas por una combinación de materiales, lo que permite crear un efecto similar al de un blindaje laminado. Esta técnica se utiliza en la mayoría de los carros de combate modernos, como es el caso del Leopard 2E. Al combinar diferentes materiales con distintas propiedades, se consigue acentuar el desvío de la trayectoria del proyectil y, como resultado, se reduce su capacidad de penetración, mejorando así las propiedades balísticas de las placas.

Dado que las placas deben ser transportadas individualmente por un combatiente, la portabilidad y el peso son factores críticos a considerar. Cada placa se diseñará con unas dimensiones aproximadas de 120x60x3 cm, permitiendo así su acarreo, lo que resulta en un volumen de 21.600 cm³. Por lo tanto, es esencial que los materiales utilizados en estas placas sean livianos.



Para evaluar su viabilidad, se comparan las densidades de los distintos materiales presentes en la tabla 2. Se tomará como suposición que la placa estuviera compuesta en al menos un 65% por cada uno de ellos. Tomando el valor de más restrictivo para su densidad se procede a calcular su peso (tabla 3).

Material	Densidad (g/cm ³)	Volumen total de la placa (cm ³)	Volumen del material en la placa (cm ³)	Peso (kg)
Resina	1.4	21600	14040	19.656
Kevlar	1.44	21600	14040	20.2176
Aluminio	2.7	21600	14040	37.908
Acero	7.85	21600	14040	110.214
Fibra de Carbono	1.6	21600	14040	22.464
Materiales Cerámicos	3.9	21600	14040	54.756
Poliamida	1.14	21600	14040	16.005

Tabla 3: Cálculo del peso de distintos materiales.

Fuente: Elaboración propia

En este primer proceso de selección de los materiales, se considera que un soldado promedio del Ejército de Tierra, que haya obtenido la suficiencia y mantenga vigente su Test General de la Condición Física, es capaz de manipular un peso total de hasta 40kg. Por lo tanto, se establece un límite de peso equivalente proporcional al 65% de esa masa, es decir, 26 kg, con el fin de descartar aquellos materiales que no cumplan con los requisitos de portabilidad y peso. En base a este criterio se determina que los materiales que cumplen estos requisitos son la resina, el Kevlar, la fibra de carbono y la poliamida.

Con el objetivo de minimizar el peso de las placas, garantizando así su maniobrabilidad y reduciendo su carga logística, se ha decidido excluir la fibra de carbono. Esta elección se basa en su peso, que es ligeramente superior al de los materiales restantes. Asimismo, se trata de un material caro, lo que contribuye a su exclusión en función de consideraciones económicas.

4.2.2 PRUEBA BALÍSTICA

Una vez realizada la primera criba en base a la portabilidad y peso de los materiales a emplear se realiza un estudio balístico de los materiales cuyo objetivo será evaluar la capacidad de un compuesto de Kevlar con resina como conglomerante y poliamida para resistir impactos de diversos calibres y determinar su eficacia en términos de protección balística. Para ello se emplea el siguiente procedimiento:

- Diseño de un banco de pruebas
- Diseño de placas balísticas
- Pruebas de impacto con diversos calibres
- Resultados análisis y conclusiones



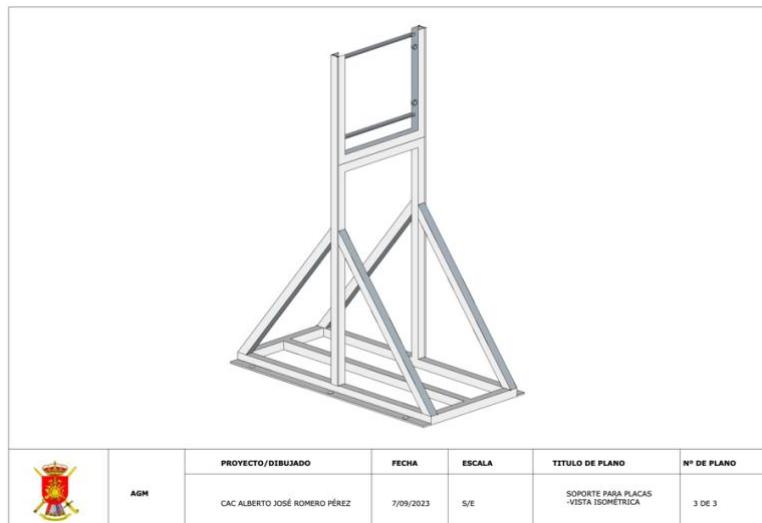
4.2.2.1 Diseño de banco de pruebas

Durante el proceso de diseño se ha seguido un enfoque meticuloso e integral que abarca diversos aspectos cruciales. La creación de un banco de pruebas efectivo no solo implica la consideración de las placas en sí, sino también la adaptabilidad, durabilidad y estabilidad de la estructura en general. Uno de los principios fundamentales al diseñar el banco de pruebas fue su adaptabilidad. Se tuvo en consideración que la unidad podría requerir utilizar diferentes tipos y tamaños de placas en futuras pruebas balísticas. Por lo tanto, el diseño no solo se centró en la capacidad para alojar las placas de este trabajo, sino que se pensó teniendo en consideración la capacidad para alojar placas de diversas características. Esta flexibilidad garantiza que pueda cumplir con múltiples propósitos en el futuro.

La estabilidad del banco es crítica para la precisión y consistencia de las pruebas balísticas. Para garantizar una fijación robusta, se incorporan elementos de anclaje al suelo en el diseño. Esto implica la inclusión de puntos de anclaje ubicados en la base de la estructura permitiendo que se sujeten firmemente al terreno, minimizando cualquier movimiento no deseado causado por los impactos a lo largo de las diversas pruebas.

Asimismo, y con el objetivo parejo de reducir el movimiento de las placas a lo largo de las pruebas, también se ha considerado necesario desarrollar un sistema de sujeción y ajuste destinado a mantener los materiales fijados a la estructura durante la realización de los ensayos. Este sistema, se basa en el uso de cuatro tuercas situadas en la parte posterior del soporte de las placas, lo que permite un ajuste preciso para adherir los elementos de ensayo de manera más firme si fuese necesario.

Teniendo en consideración todas estas características, se procede a realizar un modelado en tres dimensiones del banco de pruebas mediante software (figura 7) así como los planos de la misma (anexo I). En este proceso, se ha utilizado un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD), permitiendo así una planificación precisa y detallada, teniendo en cuenta aspectos esenciales como dimensiones, ubicación de las placas, puntos de anclaje y la capacidad de adaptarse a diferentes placas. El modelo virtual facilitó la visualización tridimensional del diseño y la optimización de los componentes estructurales.



*Figura 7: Perspectiva isométrica del banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia*



Una vez que los planos estuvieron completos y detallados, se procedió a la construcción del banco. Se decidió utilizar hierro para su fabricación con el fin de garantizar la robustez y durabilidad de la estructura, ya que este material se caracteriza por su gran resistencia y capacidad para soportar cargas significativas a lo largo del tiempo. La labor de construcción de la pieza recayó en el personal propio de la Unidad, lo que aseguró que se llevara a cabo con alto nivel de atención y cumpliendo rigurosos estándares de calidad y seguridad. La experiencia y habilidad del personal implicado (previamente instruido en labores similares ya que se trata de una unidad con un alto grado de especialización), garantizó que la estructura se fabricara de manera precisa y se ajustara a las especificaciones técnicas reflejadas en los planos. La figura 8 ilustra el resultado final.



Figura 8: Banco de pruebas resultado final
Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Diseño de placas balísticas

La etapa de diseño de las placas balísticas es fundamental para garantizar la calidad y precisión del experimento. Se ha seguido un enfoque meticuloso en la creación de dos tipos de placas con diferencias notables en su composición y estructura. Asimismo, se han tenido en consideración las dimensiones y medidas de la estructura del banco; garantizando así que los materiales se ajusten perfectamente a su lugar designado, evitando movimientos no deseados durante el transcurso de los experimentos que podrían poner en riesgo la calidad de los mismos.

La primera de las placas es hueca y presenta bordes más gruesos, mientras que la segunda es rellena y presenta bordes más finos. Este contraste permitirá ilustrar de una manera precisa la diferencia en la resistencia de ambas, así como las propiedades que tienen los materiales compuestos, principalmente el desvío de la trayectoria tensa del proyectil debido al efecto similar al del blindaje laminar característico de los "composites". La placa rellena tiene unos bordes compuestos por un 65% de resina y un 35% de Kevlar, así como un interior de poliamida, lo que proporciona una combinación, de ligereza, rigidez y resistencia; mientras que la hueca solo está formada por unos bordes de composición idéntica, sin relleno interior. El objetivo de esta última placa no es comprobar la viabilidad balística de la misma, sino ilustrar la diferencia entre un material compuesto y otro que no lo es. La elección de la composición de las placas es crucial, ya que tendrá un efecto directo en la capacidad de las mismas para resistir impactos.



Para garantizar la precisión en el diseño, se ha procedido de manera idéntica a la concepción del banco de pruebas. Se ha comenzado por modelar utilizando un programa de Diseño Asistido por Ordenador para elaborar piezas tridimensionales detalladas. Aunque el tamaño de estas placas de prueba, no será el mismo que el de las placas que formarán parte del sistema modular final, sí que respetarán en la medida de lo posible su escala; su ancho será dos veces su largo; y su grosor idéntico (3cm). Asimismo, tendrán una forma similar a las placas finales, con un sistema de acople tipo macho-hembra en sus laterales. Estos modelos servirán como base para la fabricación de las placas y asegurarán que cumplan con las especificaciones requerida. Los planos completos de estos modelos se presentan en el anexo II.

La elaboración de las placas ha sido llevada a cabo por la empresa Strongwell. Esta acumula una amplia experiencia en la manipulación y fabricación de materiales compuestos. Aunque su enfoque es principalmente en el ámbito de la construcción, esto no es un impedimento ya que la empresa tiene conocimientos especializados en el procesamiento de "composites" para garantizar que mantengan sus propiedades y cumplan con los estándares de rendimiento necesarios. Asimismo, Strongwell ha obtenido la certificación ISO 9001, un estándar internacional en la gestión de calidad, demostrando así su compromiso con la mejora continua de sus procesos y la entrega de productos de alta calidad. Las figuras 9 y 10 ilustran el resultado final.



Figura 10: Placa rellena. Fuente: elaboración propia



Figura 9: Contraste placa rellena y hueca. Fuente: elaboración propia

4.2.2.3 Pruebas de impacto

Una vez finalizados el banco de pruebas y las placas, se procede a realizar una prueba de impacto con diversos calibres. Este estudio busca proporcionar información objetiva sobre la resistencia y desviación de la trayectoria de un proyectil en relación a la composición de las placas. Los resultados obtenidos en esta prueba de impacto aportarán datos fundamentales acerca de la viabilidad del uso de este material compuesto en fortificación.

El propósito de esta prueba es comprobar la resistencia balística del material con el que se fabricarán las placas modulares finales del trabajo. En este sentido, evaluaremos diversos cartuchos de amplio uso en la actualidad, incluyendo:

- 9 mm PB
- 5,56x45 OTAN
- 7,62 x 51 OTAN



Esta munición es empleada por la mayoría de las armas de uso individual en los ejércitos a nivel internacional, incluyendo el nuestro. Entre las armas en dotación en el Ejército de Tierra se encuentran la pistola HK USP, el fusil HK-G36E y el fusil de precisión ACCURACY AW, los cuales utilizan sendos cartuchos.

Este trabajo no solo tiene como objetivo potenciar la fortificación en situaciones de combate convencional, sino que también pretende adaptarse a un teatro de operaciones híbrido presente en la actualidad. Este escenario se caracteriza por la presencia de grupos insurgentes, y guerrillas que podrían utilizar armamento menos convencional con otro tipo de municiones. Por esta razón también se realizarán pruebas con los siguientes calibres:

- .38 SPL
- 9mm blindada

Para llevar a cabo este experimento, se procede a disparar contra las placas balísticas diseñadas, montadas sobre el banco de pruebas. Este procedimiento tiene como objetivo minimizar cualquier error que pudiese afectar la precisión de los resultados obtenidos.

Ambas placas serán impactadas por una variedad de cartuchos, a diferentes distancias (5m, 15m, 25m, 50m, 200m), con el propósito de evaluar su desempeño en diversas situaciones. Mientras que la placa rellena con poliamida tiene como finalidad principal la comprobación de su resistencia balística, la placa hueca se emplea principalmente como comparativa con la primera, especialmente en lo que respecta a la desviación de la trayectoria balística. No se espera que la placa hueca ofrezca una resistencia significativa, razón por la cual se somete a impactos de calibres menores. En contraste, la placa rellena se enfrenta a disparos de calibres superiores, ya que se anticipa que poseerá una mayor capacidad para resistir dichos impactos.

Para demostrar de manera concreta los principios previamente expuestos, se han diseñado cuidadosamente una serie de ejercicios de tiro que se llevarán a cabo en relación con las placas balísticas mencionadas anteriormente. Estos ejercicios han sido meticulosamente planificados para proporcionar una evaluación completa de las capacidades y funcionalidades de cada tipo de placa:

PLACA HUECA

1. 3 impactos con cartucho 9mm PB a 15m
2. 3 impactos con cartucho 9mm Blindado a 15m.

PLACA RELLENA

1. 1 impacto con cartucho 9mm a 15m
2. 1 impacto con cartucho 5,56x45mm a 25m
3. 1 impacto con cartucho 7,62x51mm a 200m
4. 1 impacto con .38 SLP a 5m
5. 1 impacto con .38 SLP a 50m



Asimismo, para el registro de los datos obtenidos durante el experimento y el posterior procesamiento de los mismos, se ha diseñado una ficha de registro teniendo en cuenta los principales parámetros que se desean obtener. Este documento se cumplimenta para cada prueba, y ofrece un registro fehaciente de los resultados obtenidos durante el transcurso de la misma. Las fichas de registro llenadas, así como la plantilla de las mismas están reflejadas en los anexos III y IV respectivamente. Una vez cumplimentadas se procede a la centralización y el traslado de la información más relevante a una tablas para su posterior análisis (tablas 4 y 5); obteniendo los siguientes resultados.

4.2.2.4 Resultados análisis y conclusiones

PLACA RELLENA



Figura 11: Orificios de entrada en placa rellena
Fuente: Elaboración propia

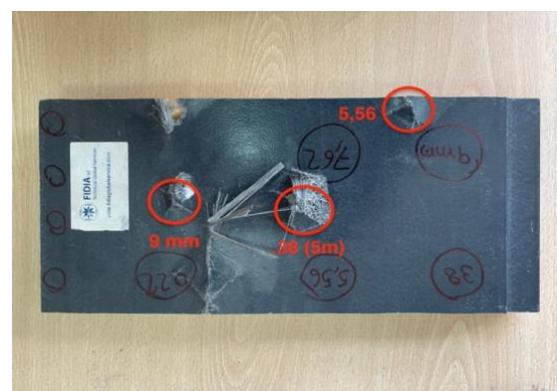


Figura 12: Orificios de salida en la placa rellena
Fuente: Elaboración propia

Cartucho	Distancia	Impacto capa exterior	Penetración de proyectil	Impacto capa trasera	Salida de bala	Desvío de trayectoria	Dirección de desvío
.38 SPL	50m	Sí	No	No	No	*	*
.38 SPL	5m	Sí	Sí	Sí	No	Sí	↑
9 mm PB	15m	Sí	Sí	Sí	No	Sí	↑
5,56 x45	25m	Sí	Sí	Sí	No	Sí	↑
7,62x51	200m	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	↓

Tabla 4: Análisis prueba balística placa rellena
Fuente: Elaboración propia

El cartucho .38, disparado a una distancia de 50m, no solo no es capaz de penetrar la placa, sino que tampoco deja una marca discernible con la forma del proyectil en la superficie. Sin embargo, sí genera una pequeña grieta lateral a la izquierda de la zona de impacto, alterando sutilmente la parte anterior de la placa. En contraste, su homólogo, disparado a una distancia de 5m sí que logra penetrar la placa, impactando contra la parte trasera y ocasionando una deformación notoria en el lado izquierdo del punto de contacto entre la bala y la lámina posterior, aunque, el proyectil no es capaz de atravesar la placa.

La evaluación de la penetración del cartucho 5,56x45 mm, efectuada a una distancia de 25m, arroja un resultado similar al anterior aunque con una ligera diferencia, la bala penetra en



la placa, pero impacta en la lámina trasera con menor fuerza. Lo que resulta en la ausencia de cualquier deformación y/o marca en la parte posterior de la placa.

Por otro lado, el cartucho de 9mm a 15m consigue penetrar en la placa y provoca una deformación más visible que la anterior en el punto de contacto entre el proyectil y la lámina trasera, aunque este no llega a salir. La razón detrás de su aparente mayor capacidad de penetración en comparación con el cartucho de 5,56x45 mm podría deberse a que el primero impactó en una zona cercana a la deformación previamente causada por el disparo de .38 SPL a 5m. Además de esto, la distancia de disparo de 10m menor que la del cartucho podría haber influido también en el resultado.

Por el contrario, el cartucho de 7,62 sí que logra atravesar con éxito la placa en su totalidad. En esta prueba en particular, es especialmente notorio el cambio de trayectoria del proyectil. Se puede apreciar que penetra en la lámina anterior, mientras que el orificio de salida es inexistente debido al cambio de trayectoria de la bala en el eje vertical causado por el material. Este experimento muestra la gran capacidad del material compuesto de desviar la trayectoria de los proyectiles mediante una gran acentuación de su recorrido parabólico; causando que la munición pierda en gran medida sus propiedades balísticas.

A raíz de las diversas pruebas realizadas, se concluye que una sola placa es eficaz contra metralla y es capaz de resistir impactos de cartuchos de hasta 5.56x45 mm. Sin embargo, si se anticipa la posibilidad de enfrentar municiones de calibres superiores, como por ejemplo las de 7.62x51 mm, es necesario reforzar la protección. Esto se podría lograr mediante la superposición de dos placas, lo que resulta en una defensa más robusta capaz de detener impactos de mayor potencia.

PLACA HUECA



Figura 13: Orificios de entrada placa hueca
Fuente: Elaboración propia

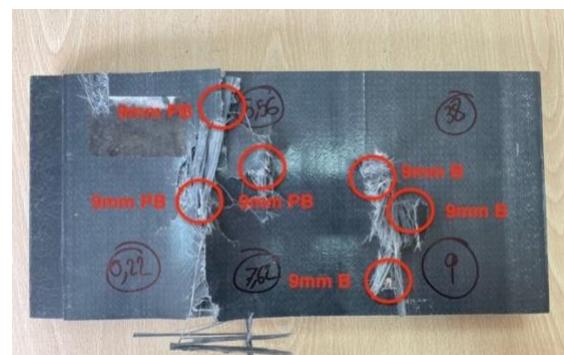


Figura 14: orificios de salida placa hueca
Fuente: Elaboración propia

Cartucho	Número de cartuchos	Distancia	Impacto capa exterior	Penetración de proyectil	Impacto capa trasera	Salida de bala	Desvío de trayectoria
9mm blindada	3	15	Sí	Sí	Sí	Sí	No
9mm PB	3	15	Sí	Sí	Sí	Sí	No

Tabla 5: Análisis prueba balística placa hueca
Fuente: Elaboración propia



Como ya se mencionó anteriormente, este experimento no tiene como objetivo evaluar la resistencia balística del objeto en cuestión sino servir como mera comparativa y contraste con la placa rellena de poliamida. A pesar de que los cartuchos poseen un calibre igual o inferior a los utilizados en el experimento anterior, tanto los proyectiles de 9mm PB como los blindados, consiguieron penetrar y atravesar la placa. Ambas municiones causaron daños significativos y deformaciones en el material mucho más acentuados en comparación con los proyectiles utilizados contra la placa rellena, a pesar de que las pruebas realizadas en esta última han supuesto una exigencia mayor.

Asimismo, la ausencia de desvío en la trayectoria de la bala al impactar en la placa hueca, en contraste con la marcada desviación observada en el primer experimento, subraya la mayor eficacia de una protección laminar en base a "composites" en contraste con una protección tradicional basada en placas formadas por un solo material.

4.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE FORTIFICACIÓN EN BASE A PLACAS MODULARES

Una vez determinada la resistencia balística del material compuesto que será utilizado en la construcción del sistema y su viabilidad ante municiones de diversos calibres, se procede al diseño del mismo empleando un software de modelado informático de CAD siguiendo los criterios establecidos anteriormente (los planos completos de los diversos elementos están en el anexo V).

Con el objetivo de simplificar su montaje y aumentar la velocidad del mismo, es imperativo que el número de piezas a emplear sea el mínimo posible. Por consiguiente, se ha diseñado un módulo de fortificación básico que constará tan solo de tres elementos:

1. Placa: la unidad principal que formará la estructura.
2. Pieza estructural: el elemento que aportará integridad a la estructura y actuará como nexo entre los distintos módulos de placas.
3. Elemento de fijación: el componente que asegurará la conexión entre la placa y la pieza estructural.

Durante la prueba balística, se ha determinado que una sola placa de 3 cm de grosor no es suficiente para detener un impacto de 7,62x51mm. Por lo tanto, para abordar esta necesidad, se ha diseñado un elemento de fijación adicional que permite la incorporación de una segunda placa cuando se anticipa la posibilidad de enfrentar municiones de dicho calibre.

Además, si se determinase que la estructura defensiva a construir requiriese de techo, se ha desarrollado una pieza de apuntalamiento que permite la fijación de vigas y pilares. Estos dos elementos, a su vez, estarán formados por la pieza estructural mencionada anteriormente.

Para satisfacer estas dos necesidades específicas, se ha diseñado un módulo complementario que incluye:

1. Elemento de Fijación para Doble Placa: Este componente permite la adición de una segunda placa cuando es necesario aumentar la resistencia balística de la estructura



para munición de calibre superior a 5,56x45 mm.

2. Elemento de Apuntalamiento: se utilizará para fijar vigas y pilares.

4.3.1 MÓDULO DE FORTIFICACIÓN BÁSICO

4.3.1.1 PLACA

Esta pieza es el elemento de abrigo del sistema de fortificación. Para diseñar sus medidas se ha tenido en cuenta en primer lugar su resistencia a los impactos. Durante la prueba balística se concluyó que un espesor de 3cm de este material es capaz de resistir impactos de cartuchos de hasta 5,56x45 mm. Por consiguiente, este se establece como su grosor final, y en caso de que se requiera una protección para un calibre de mayor se solaparán y fijarán dos placas idénticas.

Para obtener las medidas de largo y ancho, 120cm x 60 cm, se ha tenido en cuenta tanto la portabilidad como el área de protección. Su longitud permite que, una vez colocada verticalmente, pueda ofrecer una protección de la mayoría del cuerpo sin que dificulte el manejo de las armas por parte del combatiente. Su anchura a su vez, permite que esta sea ergonómica a la hora de ser transportada, ya que puede ser cargada cómodamente de manera longitudinal entre el brazo y el tronco.

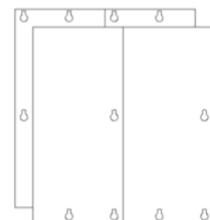
Es necesario que las placas se integren sin esfuerzo entre sí y se anclen con facilidad a las piezas estructurales. Por lo tanto, se han diseñado utilizando conectores macho en la parte superior e izquierda, y conectores hembra en la parte inferior y derecha, permitiendo un ensamblaje rápido de las piezas. También se incorporan cavidades concebidas para la inserción de elementos de fijación con diversas configuraciones, garantizando así que el sistema sea versátil y se adapte a las necesidades específicas del proyecto de fortificación que se desee llevar a cabo.



Figura 16: Placa isométrico
Fuente: Elaboración propia



Figura 15: Placas acopladas
Fuente: Elaboración propia





El peso no debe superar los 40kg para posibilitar su acarreo y debe reducirse en la medida de lo posible para facilitar su manejo, por consiguiente, se procede a calcularlo:

Esta placa al igual que la utilizada en la prueba balística, tiene un volumen exterior formado por Kevlar utilizando resina como conglomerante y un volumen interior formado por poliamida. Por consiguiente, se calcula su peso de la siguiente manera:

1. Se obtiene la densidad del volumen exterior e interior.

$$D. \text{ Interior} = 1.14 \text{ g/cm}^3$$

$$D \text{ exterior} = 0,35 \times \text{densidad del Kevlar} + 0,65 \times \text{densidad de la resina}$$

$$= 0,35 \times 1,44 \text{ g/cm}^3 + 0,65 \times 1,4 \text{ g/cm}^3 = 1,41 \text{ g/cm}^3$$

2. Se calcula el volumen tanto del material interior como del material exterior de las distintas partes de la pieza.

	V. Total (cm ³)	V. Exterior (cm ³)	V. Interior (cm ³)
Conejor macho	1500	1386,5	113,5
Conejor hembra	3000	2773	227
Parte central	12000	11594	406
SUMA TOTAL	16500	15253,3	746,5

Tabla 6: Volúmenes de la placa

Fuente: Elaboración propia

3. Se multiplica la densidad de cada material empleado por el volumen que ocupa dentro de la pieza.

	(Volumen cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Peso (kg)
Exterior	746,5	1,41	1,052 kg
Interior	15253,3	1,14	17, 388 kg

Tabla 7: Pesos de la placa

Fuente: Elaboración propia

4. Se suman los pesos de las partes para obtener el peso total

$$\text{Peso total } 1,045 + 17,388 = 18,5 \text{ kg}$$

El peso obtenido es menos de la mitad del límite de 40kg establecido, por consiguiente, la pieza es viable para su acarreo y montaje.

4.3.1.2 PIEZA ESTRUCTURAL

Este componente no tiene como finalidad resistir impactos balísticos, pero aun así se empleará una composición para su elaboración idéntica a la de la placa (un borde exterior de Kevlar con resina como conglomerante y una parte interior de aramida) con el objetivo de maximizar su ligereza y minimizar la fricción entre los distintos componentes.



El fin principal de este elemento, es aportar integridad estructural al sistema y permitir el nexo entre distintos módulos de placas ensamblados entre sí. Para facilitar esta labor, las cavidades de la pieza que permitirán alojar el elemento de fijación, están distribuidas de manera óptima permitiendo el máximo número de configuraciones posibles.

La pieza debe poder actuar tanto de viga como de pilar, pudiéndose acoplar entre sí de manera que tenga la capacidad de formar módulos para adaptarse a las medidas que dichos elementos requieran acorde a la estructura de fortificación que se vaya a llevar a cabo. Por consiguiente, presenta un borde superior que actúa como conector macho y un borde inferior que actúa como conector hembra.



Figura 18: pieza estructural
Fuente: Elaboración propia



Figura 17: pieza estructural acoplada
Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del peso se procede del mismo modo que con la pieza anterior, omitiendo el cálculo de la densidad del material, ya que se ha obtenido previamente en el apartado anterior:

1. Se calcula el volumen tanto del material interior como del material exterior de las distintas partes de la pieza

	V. total (cm ³)	V. Interior (cm ³)	V. exterior (cm ³)
Conejero hembra	190	95	95
Conejero macho	170	75	95
Parte central	3600	2700	900
SUMA TOTAL	3960	2870	1090

Tabla 8: Volúmenes pieza estructural
Fuente: Elaboración propia



2. Se multiplica la densidad de cada material empleado por el volumen que ocupa dentro de la pieza

	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Peso (kg)
Exterior	2870	1,41	4,046
Interior	1090	1,14	1,246

Tabla 9: Pesos pieza estructural

Fuente: Elaboración propia

3. Se suman los pesos de las partes para obtener el peso total

$$\text{Peso total} = 4,046 + 1,246 = 5,2942 \text{ kg}$$

El peso obtenido es muy inferior al límite de 40kg establecido, por consiguiente, la pieza es viable para su acarreo e instalación

4.3.1.3 ELEMENTO DE FIJACIÓN

El objetivo de este componente es el de fijar las distintas piezas que conforman el sistema de fortificación entre sí, permitiendo que las placas y los elementos estructurales se comporten de forma solidaria.

Esta pieza se ha proyectado de manera que no sea necesario el uso de ningún tipo de herramienta para su colocación. Para ello se ha diseñado un bulón que asemeja la forma de una llave y se han modelado las cavidades de todas las demás piezas para que se adapten a tal forma. El acople entre los distintos elementos del sistema utilizando el elemento de fijación es simple, basta con introducir el bulón en la cavidad y posteriormente girarlo 180º para anclarlo.

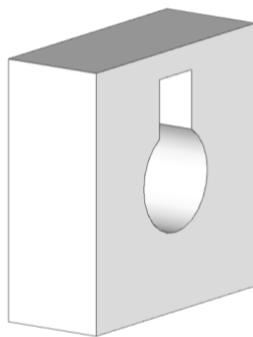


Figura 20: Hendidura para elemento de fijación

Fuente: Elaboración propia

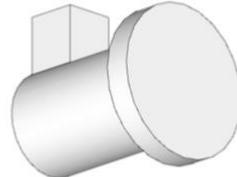


Figura 19: Elemento de fijación

Fuente: Elaboración propia



4.3.2 MÓDULO DE FORTIFICACIÓN COMPLEMENTARIO

4.3.2.1 ELEMENTO DE FIJACIÓN PARA DOBLE PLACA

El fin de este elemento es permitir el acople de dos placas superpuestas entre sí con la pieza estructural, para así poder obtener una protección contra cartuchos de 7,62. Para ello se ha modelado adaptando el diseño del elemento de fijación simple, la única diferencia entre estas dos piezas es que el elemento de fijación doble tendrá una longitud mayor. El sistema de acople es idéntico al anterior, siendo compatible con todas las cavidades de las piezas que hayan sido diseñadas con este propósito.

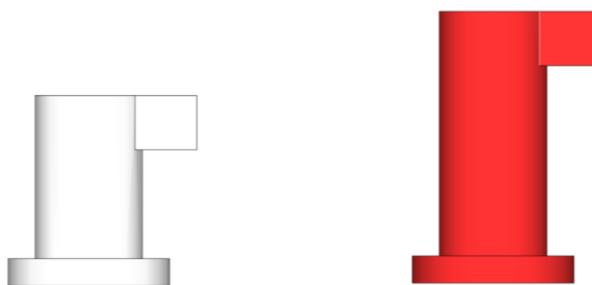


Figura 21: Comparativa elemento de fijación simple y doble
Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 ELEMENTO DE APUNTALAMIENTO

Su objetivo es la fijación entre las piezas estructurales que actúen como pilares y aquellas que actúen como vigas, para así poder techar la estructura con las propias placas si se considera necesario.

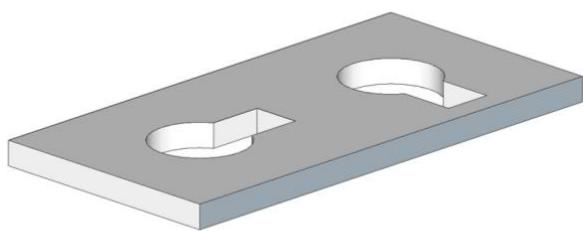


Figura 22: Elemento de apuntalamiento
Fuente: Elaboración propia



Figura 23: Elemento de apuntalamiento, ejemplo de uso
Fuente: Elaboración propia



4.4 APLICACIÓN Y COMPARATIVA DEL SISTEMA DE FORTIFICACIÓN DISEÑADO



Figura 24: Garita en base a sacos
Fuente: (Cosoy, 2016)

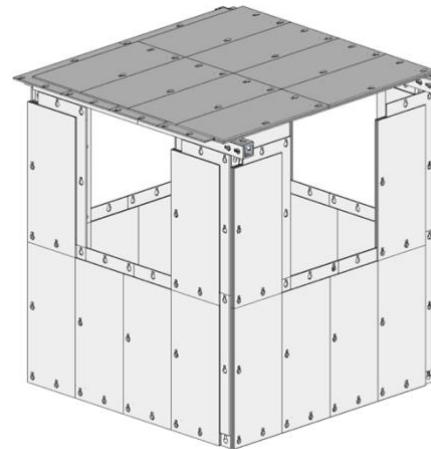


Figura 25: Garita en base a sistema de fortificación
Fuente: elaboración propia

Con el propósito de estudiar la versatilidad del sistema de fortificación basado en placas modulares diseñado, se ha modelado una garita utilizando los elementos del mismo para compararlo con su contraparte construida con sacos terreros (ver figura 24). Esta última, ha sido llevada a cabo por una unidad del Ejército Nacional de Colombia con la finalidad de proporcionar protección al personal encargado del control de acceso en una zona conflictiva. En este contexto particular, se contó con tierra disponible para llenar los sacos. No obstante, es imperativo subrayar que llevar a cabo esta tarea implica un desgaste considerable del personal. Se debe a su vez mencionar que la disponibilidad de material de relleno fue factible gracias al entorno rural en el que se encuentra ubicada. Sin embargo, es legítimo cuestionar si esta tarea habría sido posible en una ubicación más cercana a un área urbana.

La herramienta utilizada para el diseño de la garita en base al sistema de fortificación ha sido idéntica a la empleada en el apartado anterior, un modelado 3D empleando un software de CAD.

Para llevar a cabo una comparativa detallada de las dos estructuras en cuestión, se ha recurrido al uso de un “radar chart”. Este enfoque nos permite analizar y visualizar claramente las diferencias y similitudes entre ellas en varios aspectos clave.

Se han identificado las siguientes categorías de comparación consideradas de mayor relevancia para evaluar ambas estructuras:

- Protección balística
- Adaptabilidad a distintos escenarios
- Portabilidad
- Desgaste del personal implicado
- Velocidad de Montaje



Cada una de estas categorías ha sido evaluada asignándoles un valor numérico, en el que 5 representa la puntuación más óptima y 0 la menos adecuada. El uso de esta herramienta nos proporcionará una representación visual efectiva de cómo cada estructura se desempeña en cada uno de estos aspectos.

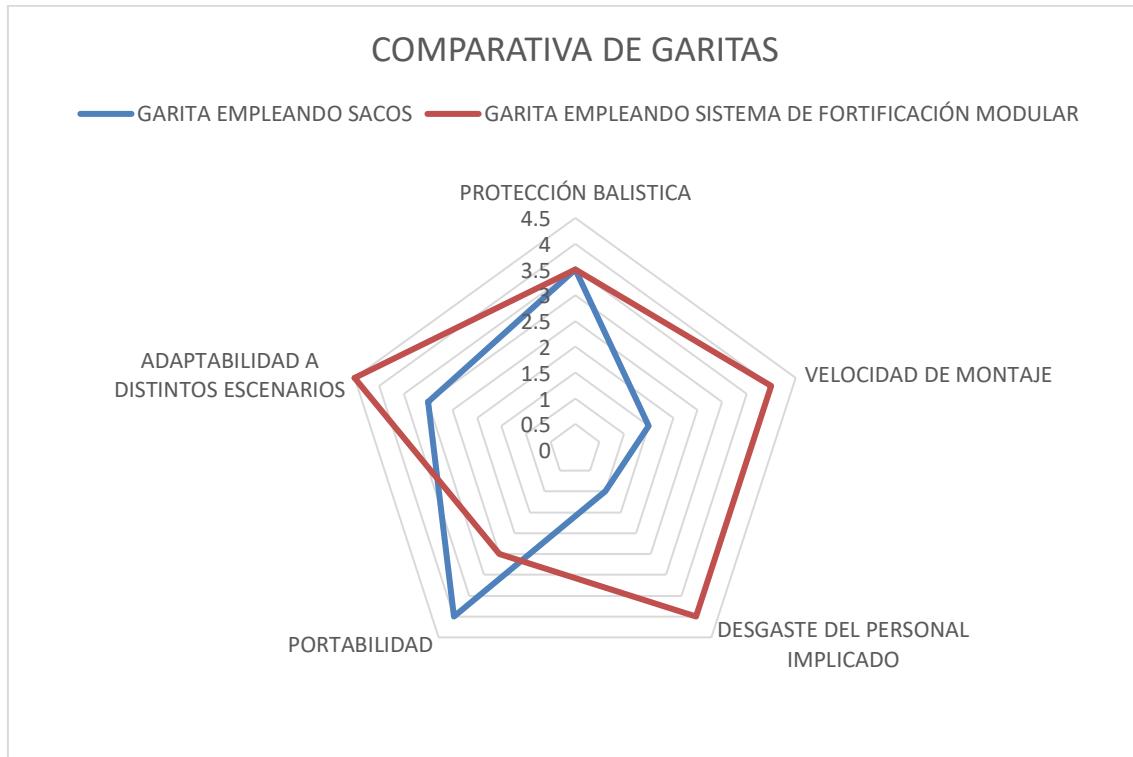


Figura 26: Comparativa de garitas
Fuente: Elaboración propia

El análisis del gráfico (ver figura 26) proporciona los siguientes resultados en cada una de las categorías de comparación:

- Protección balística: la resistencia a impactos de ambos materiales de construcción es idéntico, proporcionando un abrigo similar ante distintas amenazas, por consiguiente, ambas estructuras presentan la misma protección balística.
- Velocidad de montaje: la garita en base al sistema de fortificación modular se muestra ampliamente superior, las piezas de este han sido prefabricadas y solo requieren de su transporte y de un montaje ampliamente sencillo. Por el contrario, la estructura en base a sacos terreros requiere de la obtención del material de relleno, un proceso excesivamente lento ya que conlleva excavar el suelo; posteriormente es necesario llenar los sacos y por último transportarlos al lugar deseado.
- Desgaste del personal implicado: se trata de la categoría en la que existe un mayor contraste entre las dos garitas. La construcción de la estructura basada en sacos implica la tanto la obtención de materia prima como el rellenable y transporte de los elementos que la componen, un proceso físicamente muy demandante. En contraste, para el montaje de la garita en base al sistema de fortificación modular, solo es necesario transportar y fijar elementos muy livianos, lo cual supone un desgaste para el personal implicado prácticamente inexistente.



- Portabilidad: a pesar del peso y tamaño reducidos que presenta el sistema modular en relación con su resistencia balística, los sacos terreros se muestran superiores en esta categoría, ya que vacíos ocupan un espacio sensiblemente menor.
- Adaptabilidad a distintos escenarios: la garita en base al sistema de fortificación modular obtiene una puntuación casi perfecta en este apartado debido a que su posibilidad de colocación no está limitada por el terreno en el que se desee ubicar la misma, en contraposición con su homóloga que se muestra muy dependiente de las características topológicas de su zona de colocación.

En conclusión, el análisis resalta que, a pesar de proporcionar un nivel de protección igual o incluso superior, la estructura basada en placas modulares sobresale por su proceso de instalación notablemente más rápido y una mayor capacidad de adaptación a diversas situaciones. Además, ofrece la posibilidad de ser implementada en un entorno urbano o cualquier otro tipo de escenario. Estos resultados respaldan la elección de la estructura con placas modulares como una alternativa altamente eficaz y versátil, especialmente en situaciones donde la rapidez y la adaptabilidad son de vital importancia.

5 CONCLUSIONES

Los materiales y equipos actualmente empleados por una sección de zapadores para la fortificación expedita están muy limitados por la ubicación geográfica del terreno en el que se determine realizar dichas obras. La mayoría de los medios empleados para realizar las obras de fortificación más comunes requieren de la propia tierra excavada de la posición y/o de sacos terreros para su construcción. Esta dependencia, ha demostrado en diversas ocasiones ser perjudicial debido a las limitaciones impuestas por las características del terreno, como la imposibilidad de conseguir tierra en ciertos lugares o la escasa resistencia balística de algunos suelos. En la mayoría de los casos, estos no son adecuados, ya que, a causa de su ubicación estratégica, el combate en zonas próximas a avenidas de aproximación y núcleos urbanos destaca por su frecuencia e impacto.

En este contexto, los materiales compuestos son una solución viable a las limitaciones que los medios actuales empleados en fortificación presentan. Los “composites” se caracterizan por su versatilidad, que combina resistencia con ligereza, lo que les convierte en una opción factible para situaciones que requieran movilidad y una amplia capacidad de proyección. A pesar de que los estudios llevados a cabo por las FAS en este ámbito son limitados, a nivel internacional sí que existe una extensa bibliografía que sirve de base para el desarrollo y la utilización de los mismos.

Durante la realización de la sesión de “brainstorming”, se concluyó que la manera más óptima de abordar los diversos problemas a los que se enfrentan los medios de fortificación actuales, es mediante la utilización de estructuras modulares prefabricadas en base a materiales compuestos.

Para la selección de un material “composite” óptimo, se deben tener en cuenta la resistencia, durabilidad, versatilidad y costo de los materiales que lo forman. A raíz del estudio realizado, el material compuesto objeto de este trabajo, conformado por un interior de aramida y un exterior de Kevlar utilizando Resina como conglomerante en proporciones 35:65, cumple de



manera adecuada con estos criterios. Durante la prueba balística realizada sobre el mismo, se ha concluido que una placa de 3cm de espesor es capaz de resistir municiones de hasta 5,56x45mm. No obstante, aunque tenga la capacidad de desviar la trayectoria de un proyectil de 7,62x51 OTAN haciendo que pierda significativamente sus propiedades balísticas, este grosor no es capaz de detenerlo por completo.

La estructura construida utilizando el sistema de fortificación modular en base al material compuesto diseñado en este trabajo ha probado ser más eficaz en términos generales que la estructura basada en materiales tradicionales; igualándola en resistencia balística y superándola ampliamente en términos de velocidad de montaje, desgaste del personal y adaptabilidad.

En conclusión, el material compuesto desarrollado en este estudio demuestra una combinación efectiva de resistencia balística y ligereza. Asimismo, el sistema de fortificación modular en base a este ha demostrado ser en líneas generales una alternativa superior a los medios tradicionales utilizados para la construcción de estructuras de fortificación.

En este contexto, las líneas de investigación futuras que podrían tomarse son:

- Un estudio acerca de las distintas aplicaciones del material compuesto: evaluar los diversos usos potenciales del material compuesto en el ámbito militar. Esto podría incluir por ejemplo, su uso como placa para los chalecos antibala-antifragmento.
- Un plan de transporte del sistema de fortificación: estudiar las características de los distintos vehículos empleados por una Scu de Zapadores con el objetivo de hallar la manera más óptima de transportar el sistema en ellos.
- Un estudio acerca de los costes de producción del sistema de fortificación: realizar un análisis de los costes asociados con la producción y mantenimiento de las estructuras de fortificación basadas en el material compuesto desarrollado. Evaluar la viabilidad económica a largo plazo y considerar posibles medidas de reducción de costos sin comprometer la calidad del sistema.

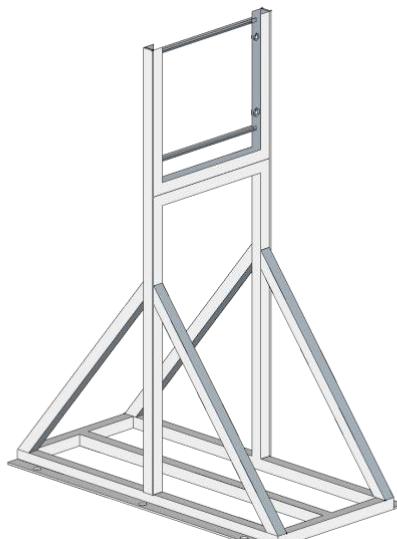


6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

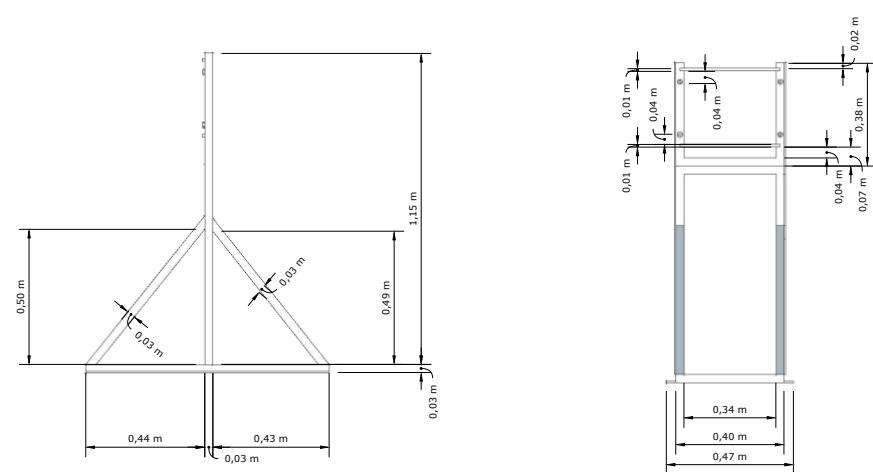
- Academia de Infantería (ACINF), 2023. *Cuaderno de Campo ACINF*. 1 ed. TOLEDO: ACINF.
- Bergström, C., 2016. *Ardenas: La batalla*. 1 ed. s.l.:Pasado & Presente.
- Bhatnagar, A., 2016. *Lightweight Ballistic Composites*. 2 ed. s.l.:Woodhead Publishing Limited .
- Carvelli, V. & Lovmov, S. V., 2015. *Fatigue of Textile Composites*. 1 ed. s.l.:Woodhead Publishing Limited.
- Chen, X., 2016. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. 1 ed. s.l.:Woodhead Publishing Limited.
- Cosoy, N., 2016. *Tanquetas, bolsas de arena y retenes militares: la zona de Colombia donde la guerra sigue viva*. 1 ed. Santander: BBC.
- Gutierrez Cruz, R., 1993. *Melilla tras la conquista: documentos para su estudio*. 1 ed. Málaga: Universidad de Málaga.
- Laguna Iglesias, M. e. a., 2018. *Estudios de simulación y de campo de la influencia en la resistencia balística de acero tratado con poliurea*. 1 ed. s.l.:Ministerio de Defensa.
- MADOC, 2005 a. *OR4-402 Orientaciones Batallón de Zapadores*. 1 ed. Granada: Ministerio de Defensa.
- MADOC, 2005 b. *OR5-409 Organización del terreno para el combates de las grandes unidades*. 1 ed. GRANADA: Ministerio de Defensa.
- MADOC, 2016. *PD3-313 Ingenieros de las Fuerzas Terrestres*. 1 ed. GRANADA: s.n.
- MADOC, 2021. *PD1-001 Empleo de las Fuerzas Terrestres*. 1 ed. GRANADA: MINISTERIO DE DEFENSA.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC), 2005. *OR5-409 Organización del terreno para el combates de las grandes unidades*. 1 ed. GRANADA: Ministerio de Defensa.
- MANDO DE ADISTRAMIENTO Y DOCTRINA (MADOC), 2016. *PD3-313 Ingenieros de las fuerzas terrestres*. 1 ed. GRANADA: MINISTERIO DE DEFENSA.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2015. *AJP-3.14 Allied joint doctrine for force protection*. 1 ed. Londres: Nato Standardization Office.
- Quintana Jato, A., 2007. *La batalla de Brunete*. 1 ed. Brunete: GEFREMA.
- Tte Gratal, S., 2022. *Diseño de instalación funcional para la instrucción de procedimientos específicos de Ingenieros en zonas urbanas*. 1 ed. Zaragoza: CUD.
- Uddin, N., 2010. *Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites*. 1 ed. Boca Raton Boston New York Washington, DC : Woodhead Publishing Limited.



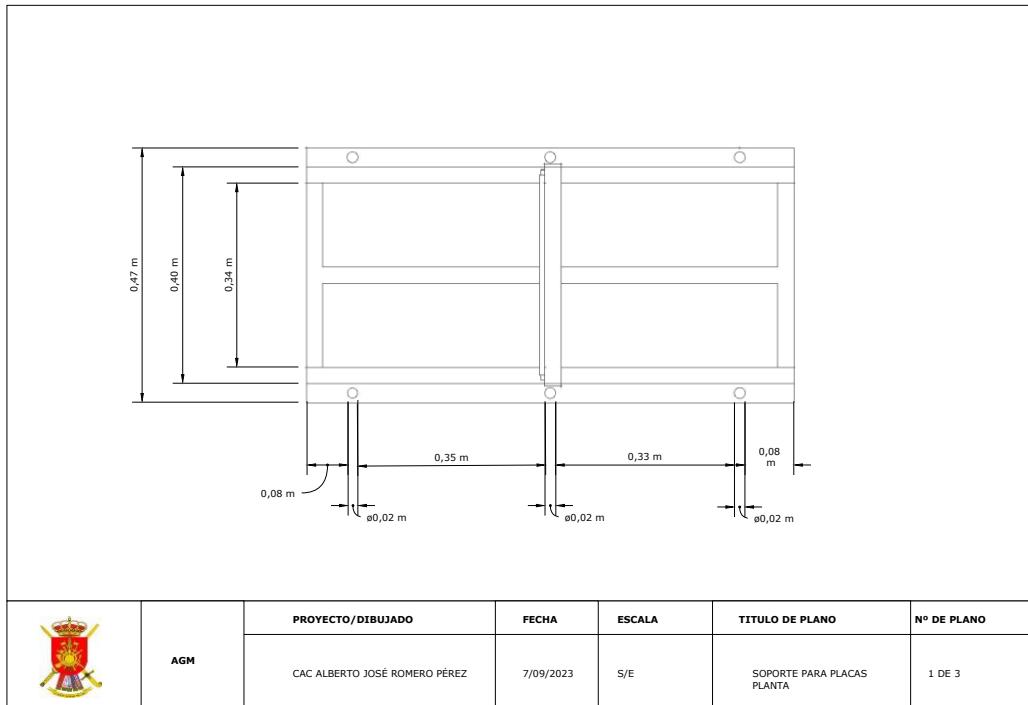
ANEXO I: PLANOS BANCO DE PLACAS



		PROYECTO/DIBUJADO	FECHA	ESCALA	TITULO DE PLANO	Nº DE PLANO
	AGM	CAC ALBERTO JOSÉ ROMERO PÉREZ	7/09/2023	S/E	SOPORTE PARA PLACAS -VISTA ISOMÉTRICA	3 DE 3

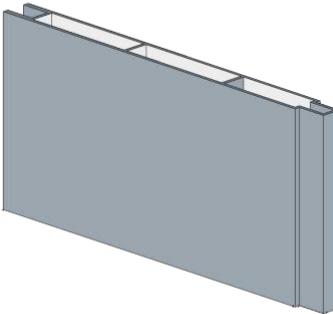


		PROYECTO/DIBUJADO	FECHA	ESCALA	TITULO DE PLANO	Nº DE PLANO
	AGM	CAC ALBERTO JOSÉ ROMERO PÉREZ	7/09/2023	S/E	SOPORTE PARA PLACAS -PERFIL -POSTERIOR	1 DE 3

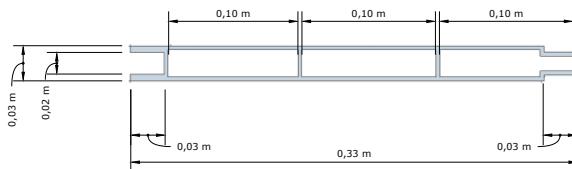




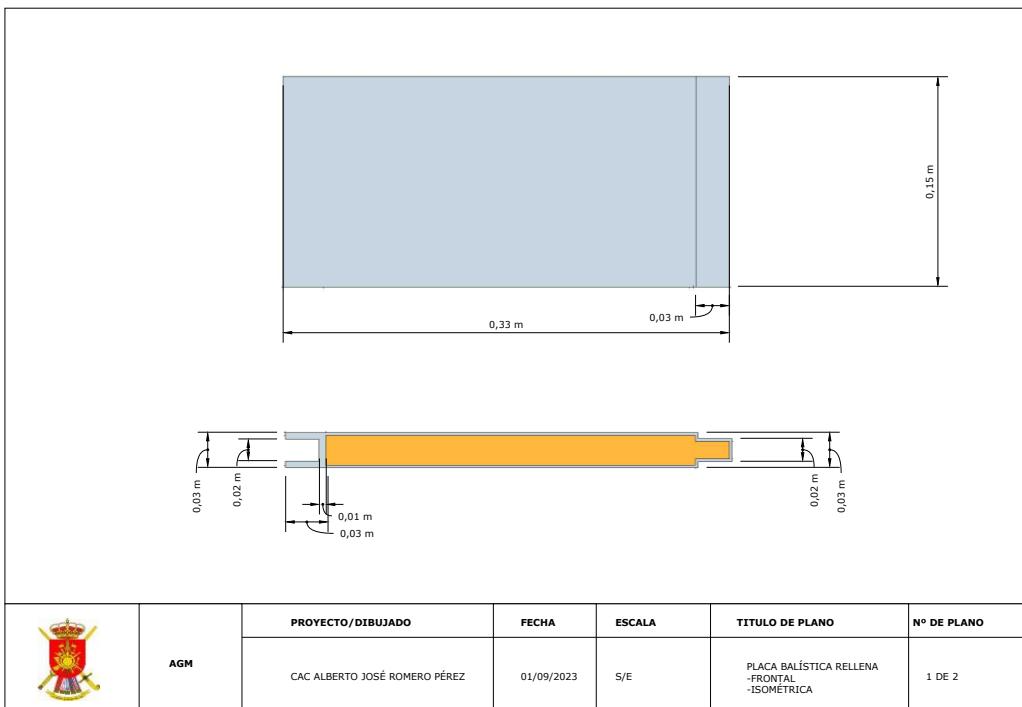
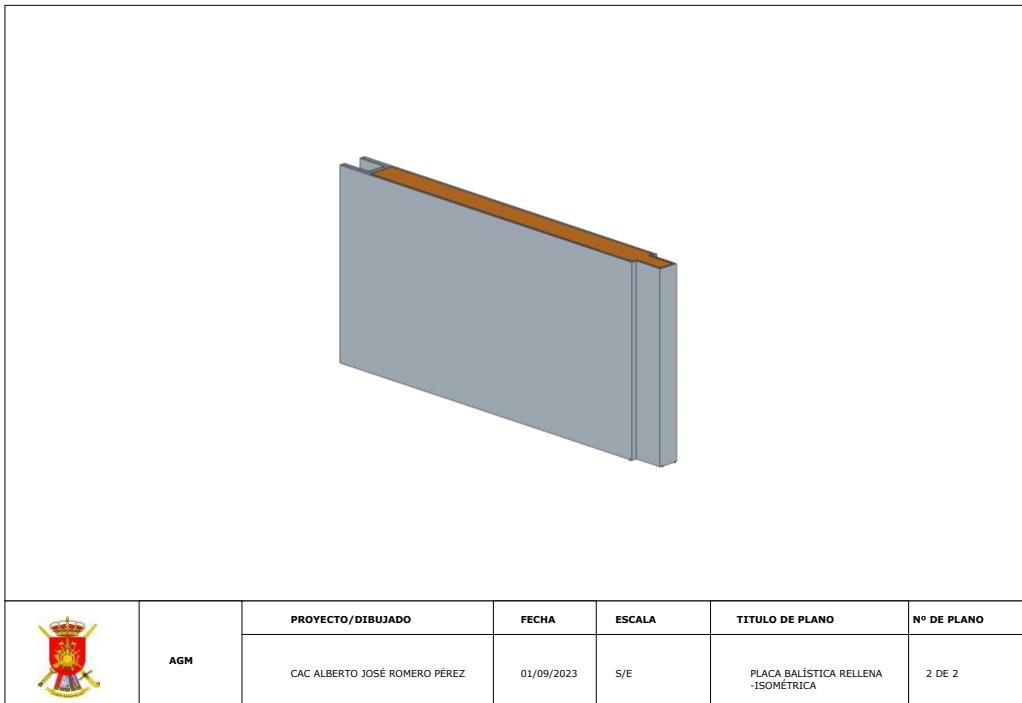
ANEXO II: PLACAS BALÍSTICAS



AGM	PROYECTO/DIBUJADO	FECHA	ESCALA	TÍTULO DE PLANO	Nº DE PLANO
				PLACA BALÍSTICA HUECA -ISOMÉTRICA	
	CAC ALBERTO JOSÉ ROMERO PÉREZ	01/09/2023	S/E		2 DE 2

AGM	PROYECTO/DIBUJADO	FECHA	ESCALA	TÍTULO DE PLANO	Nº DE PLANO
				PLACA BALÍSTICA HUECA -FRONTEL -PLANTA	
	CAC ALBERTO JOSÉ ROMERO PÉREZ	01/09/2023	S/E		1 DE 2





ANEXO III: PLANTILLA FICHA DE REGISTRO



FICHA DE REGISTRO DE PRUEBA DE IMPACTO

Nº de prueba:

Fecha de la prueba:

Concepto de la prueba:

Investigador:

DATOS DE LA PLACA (MARCAR)

Placa 1 Exterior de Kevlar rellena de resina y bordes más finos ()

Placa 2 Placa hueca con bordes de Kevlar más gruesos ()

DATOS DEL CARTUCHO

Calibre:

Medidas

Peso del Proyectil:

DATOS DEL EJERCICIO

Número de impactos:

Distancia al Blanco:

Ángulo de Impacto: perpendicular a la placa 90°

Condición del Cartucho: Nuevo

DATOS DEL IMPACTO

Impacto contra lámina anterior: [Sí / No]

Penetración de Placa: [Sí / No]

Impacto contra lámina trasera: [Sí / No]

Desviación entre impacto de lámina delantera y trasera [Sí / No / *]

Salida del proyectil: [Sí / No]

Observaciones:

DETALLES SOBRE LA DEFORMACIÓN DE LAS PLACAS:

Observaciones sobre la trayectoria del proyectil:

Cualquier otro dato relevante:

CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Temperatura:

Viento:



ANEXO IV: FICHA DE REGISTRO RELLENA



FICHA DE REGISTRO DE PRUEBA DE IMPACTO

Nº de prueba: 4

Fecha de la prueba: 10/10/2023

Concepto de la prueba: experimentación con 5,56x45

Investigador: CAC Alberto José Romero Pérez-Carro

DATOS DE LA PLACA (MARCAR)

Placa 1 Exterior de Kevlar rellena de resina y bordes más finos ()

Placa 2 Placa hueca con bordes de Kevlar más gruesos ()

DATOS DEL CARTUCHO

Calibre: 5,56x45 OTAN

Medidas: 5,56x45 mm

Peso del Proyectil: 4g

Energía Cinética del Cartucho: 1.767 J

DATOS DEL EJERCICIO

Número de impactos: 1

Distancia al Blanco: 25

Ángulo de Impacto: perpendicular a la placa 90° / fase ascendente de parábola

Condición del Cartucho: Nuevo

DATOS DEL IMPACTO

Impacto contra lámina anterior: [Sí / No]

Penetración de Placa: [Sí / No]

Impacto contra lámina trasera: [Sí / No]

Salida del proyectil: [Sí / No]

Desviación entre impacto de lámina delantera y trasera: [Sí / No / *]

Observaciones: No hay impacto contra la lámina trasera pero si se aprecia una desviación en la trayectoria del proyectil en el interior de la placa

DETALLES SOBRE LA DEFORMACIÓN DE LAS PLACAS:

Observaciones sobre la trayectoria del proyectil: se desvía horizontalmente hacia arriba

Cualquier otro dato relevante: NIL

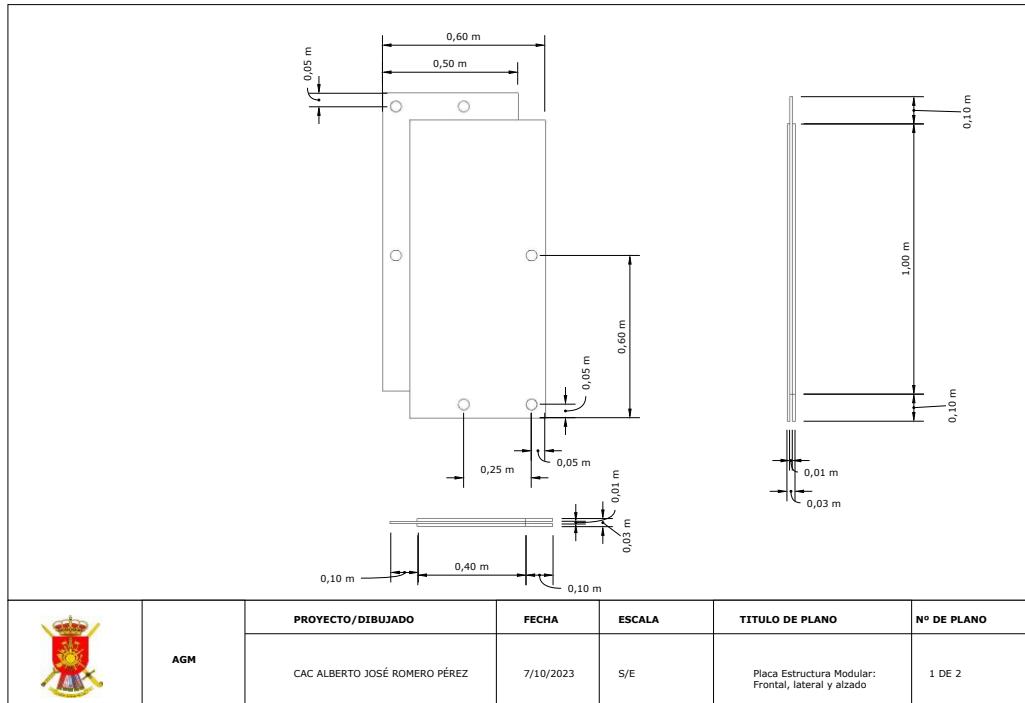
CONDICIONES METEOROLÓGICAS

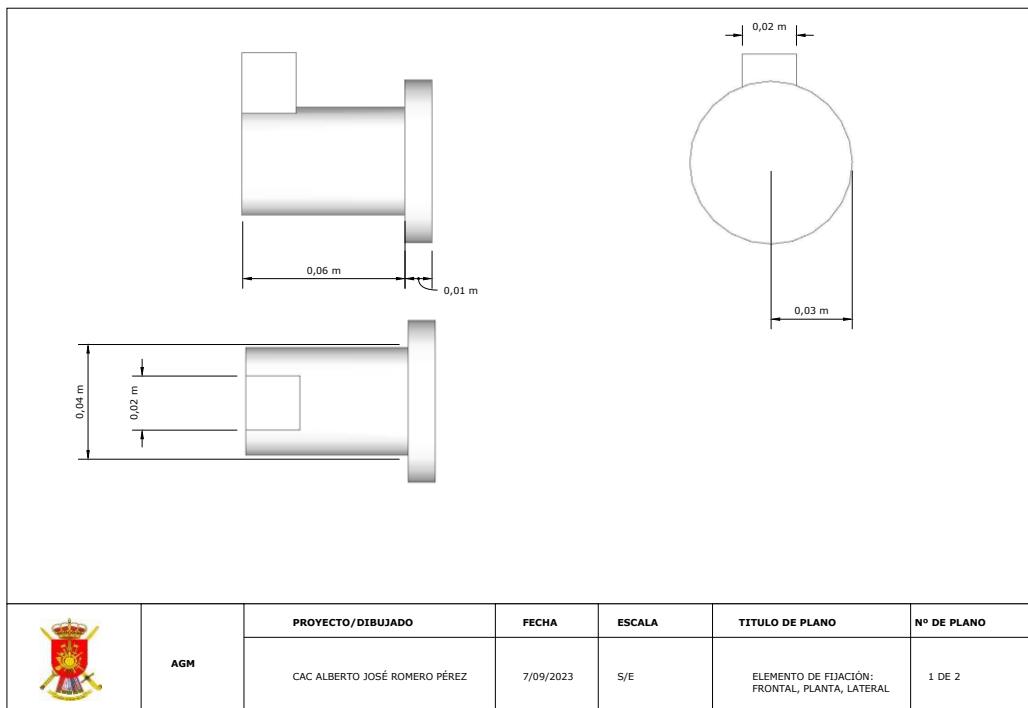
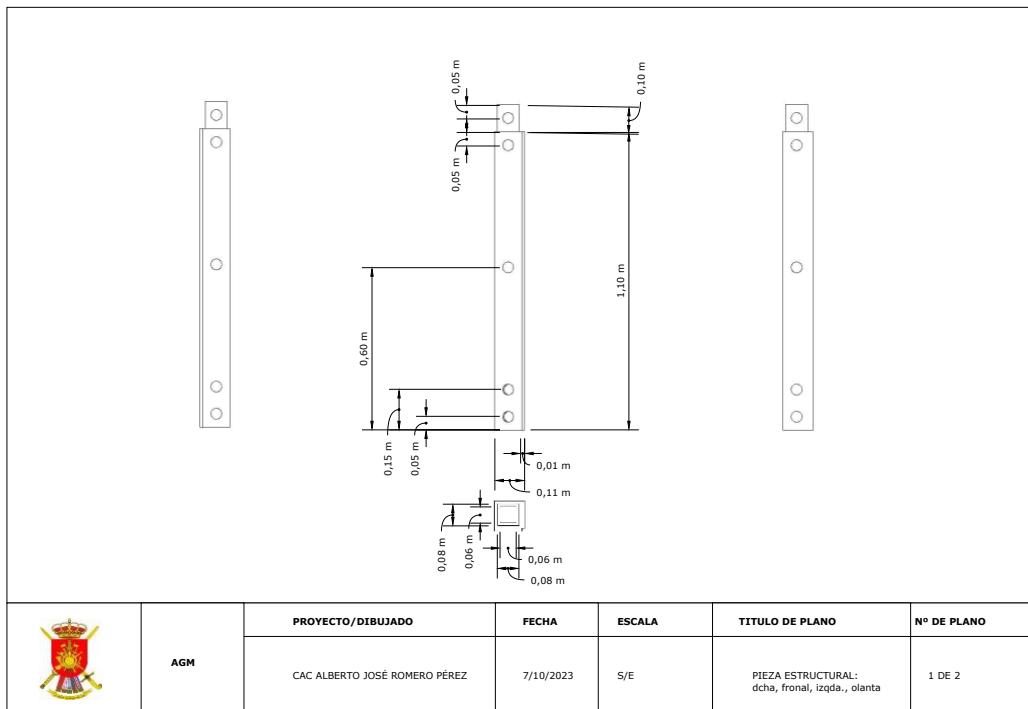
Temperatura: 23°C

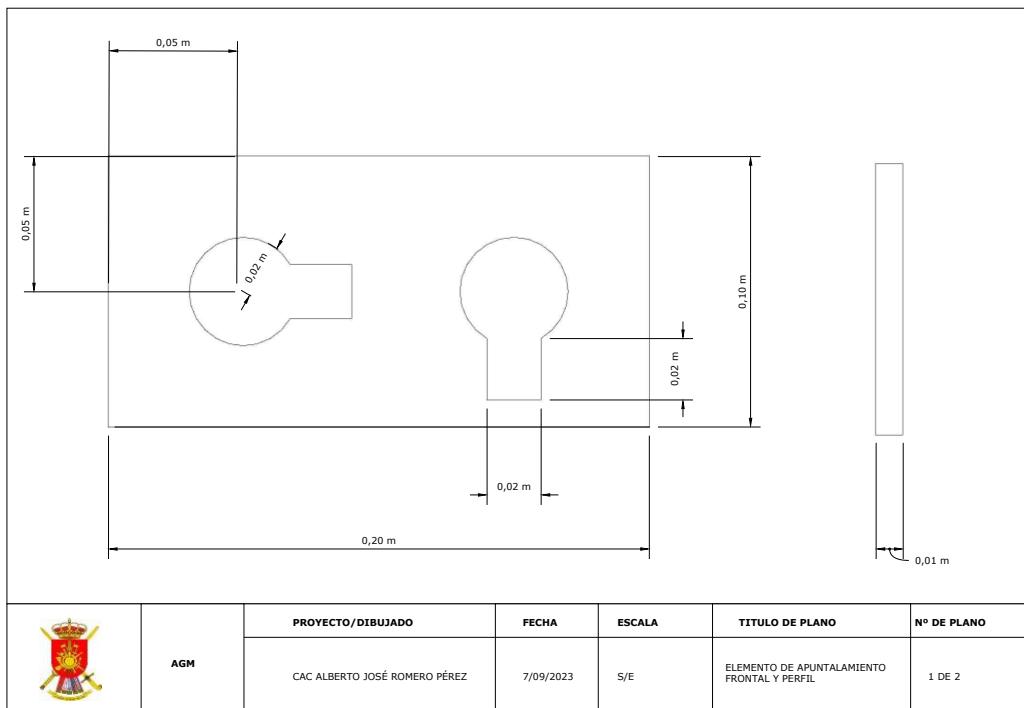
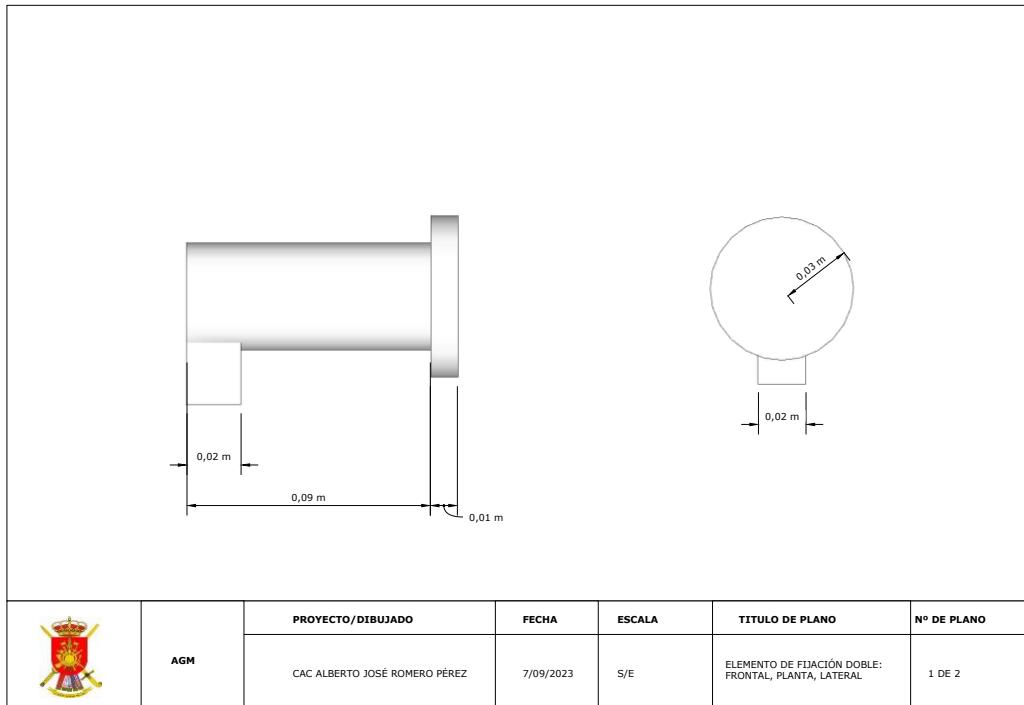
Viento: < 5km/h E



ANEXO V: PLANOS SISTEMA DE FORTIFICACIÓN









ANEXO VI: ORGANIGRAMAS

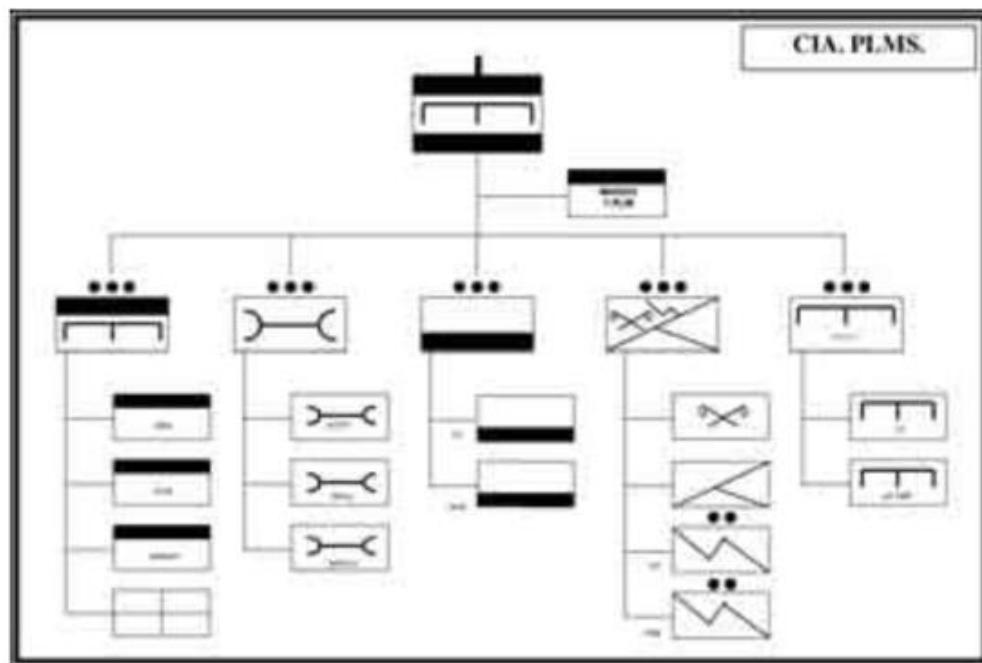


Figura 27: CIA de Plana Mayor y Servicios
Fuente: (MADOC, 2005 a)

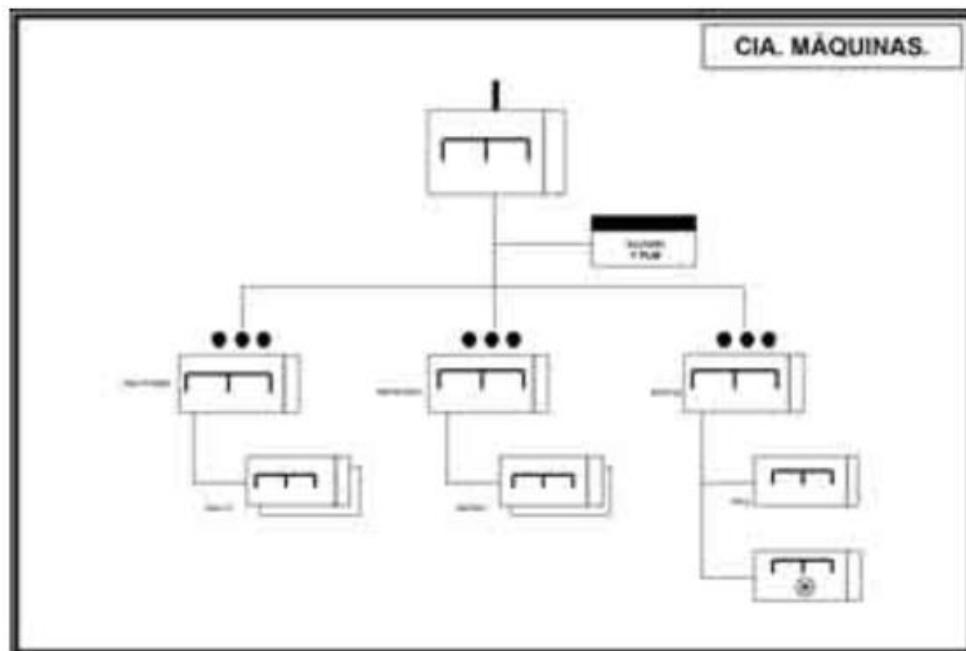


Figura 28: CIA de Máquinas
Fuente: (MADOC, 2005 a)

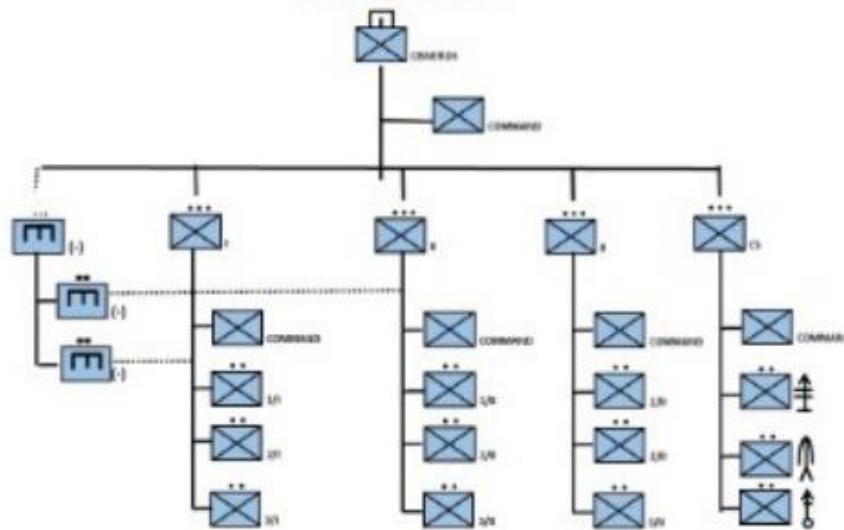


Figura 29: Subgrupo Táctico de Infantería
Fuente: (Academia de Infantería (ACINF), 2023)