



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la aplicabilidad de materiales prefabricados al diseño de estructuras para fortificaciones militares

Autor

CAC. Carlos Toledo Serrano

Director/es

Dra. Rosa María Tejedor Bielsa

Cap. José Luís Carrasco Pulido

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2016

Resumen

Dadas las actuales misiones de las Fuerzas Armadas, las Unidades de Ingenieros precisan medios de fortificación que puedan proyectarse al extranjero, rápidos y sencillos de instalar, y con un alto grado de protección frente a las nuevas amenazas, propias del combate asimétrico y la insurgencia. A partir de las necesidades de estas unidades y comparándolas con las debilidades de los medios actuales, se han definido los requisitos de los futuros medios de fortificación. Estos requisitos han sido los utilizados para llevar a cabo una prospectiva tecnológica y, así, proponer nuevos medios y materiales a incorporar en las Unidades de Ingenieros. Este trabajo propone materiales y medios alternativos para aumentar las prestaciones de las actuales barreras de hormigón, facilitar la estabilización mecánica de taludes y proteger contra impactos de bala o detonaciones los contenedores de vida. Además, se seleccionan nuevos implementos de elevación para las retroexcavadoras, que facilitarían el manejo de elementos pesados. Finalmente, se sugieren alternativas a los perfiles de acero y tablonés de madera que se utilizan actualmente.

Abstract

Given the current missions of the Spanish Armed Forces, Combat Engineer Units require fortification assets that can be projected abroad. Such assets must be quickly and easily installed and they need a high degree of protection against new threats that are characteristic of today's asymmetric combat and insurgency. From the analysis of the needs of these Units, and comparing them with the weaknesses of the current means, the requirements for the future means of fortification have been defined. These requirements have been used as a guide for a prospective technology review, with the aim of proposing new means and materials to be incorporated by the Combat Engineers Units. This End-Of-Degree Project proposes alternatives to increase the benefits of the current precast concrete barriers, to ease the mechanical stabilization of slopes, and to protect life containers against bullet impacts and detonations. Moreover, new elevation equipment for backhoes is selected, which would make heavy-loads handling easier. Finally, alternatives for currently-used steel profiles and wood planks are suggested.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi agradecimiento hacia mi Directora Académica, la Profesora D^a. Rosa María Tejedor Bielsa, y hacia mi Director Militar, el Capitán D. José Luis Carrasco Pulido, por su entusiasmo e interés durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Por otro lado, agradezco a D. Carlos López Jiménez (Director Comercial de *Betafence Corporate Services* para España y Sudamérica) y a D. Adam Wilding Webb (Director del Área *High Security Products* de *Betafence Corporate Services*) la ayuda prestada para la realización de este trabajo, a través de su asesoría en lo relativo a gaviones y otros medios de fortificación.

Reitero dicho agradecimiento hacia D. Emilio de la Red, Director Comercial de *Eco-Haus*, por su dirección técnica en lo referente a revestimientos para prevenir la fragmentación sobre las barreras de hormigón, y manifiesto mi deseo de llevar a cabo pruebas sobre el terreno cuando sea posible.

A D. Ricardo González Recio, geólogo de Dragados S.A., por su asesoría sobre técnicas de estabilización del terreno y métodos de cálculo de mecánica de suelos.

A D. Javier Ruíz Jurado, del área comercial de la empresa Tecnopol, por su asesoría y disponibilidad.

Asimismo, manifiesto mi aprecio por la información y documentación facilitada por la Oficina de Asuntos Públicos del Centro de Investigación y Desarrollo del Arma de Ingenieros de los Estados Unidos.

Finalmente, expreso mi gratitud hacia el personal del Batallón de Zapadores XII, en especial al de la 1^a Compañía de Zapadores, por su dedicación y apoyo durante las Prácticas Externas realizadas en dicha Unidad, y por su aportación a este proyecto a la hora de recabar experiencias sobre los medios analizados.

Índice

1. Introducción.....	7
2. Objetivos y metodología	7
3. Situación actual de los medios de fortificación prefabricados	8
3.1. Configuración de las obras de fortificación.....	8
3.2. Materiales y medios prefabricados usados en fortificación	9
3.2.1. Barreras de hormigón armado prefabricadas (protección perimetral)	9
3.2.2. Gaviones (protección perimetral, elementos enterrados y elevados)	10
3.2.3. Contenedores (elementos elevados).....	11
3.2.4. Refugio metálico (elementos enterrados).....	12
4. Estudio de las necesidades de las Unidades en materia de fortificación	13
4.1. Entrevistas con el personal del BZ XII	13
4.2. Estudio de la doctrina española y OTAN relativa a fortificación	14
5. Relación de necesidades de las Unidades deducidas a través de los problemas detectados.....	15
6. Innovaciones propuestas ante los problemas detectados.....	17
6.1. Mejora de las barreras prefabricadas de hormigón	17
6.1.1. Revestimientos mixtos de alto coeficiente de absorción acústica	18
6.1.2. Fórmulas de hormigones de alta densidad y elevada ductilidad	19
6.1.3. Refuerzo superficial mediante polímeros reforzados con fibra de carbono	19
6.1.4. Tratamientos de refuerzo anti-fragmentación en muros de bloque de hormigón prefabricado.....	20
6.2. Sistemas de refuerzo de taludes, compactación del terreno y mejora de obstáculos naturales mediante el uso de prefabricados	21
6.2.1. Estabilización mecánica del terreno mediante medios fabricados en materiales compuestos	22
6.2.2. Aditivos para refuerzo de tierras en ambiente desértico	27
6.3. Protección de superficies de contenedores mediante polímeros	28
6.4. Implementos para las máquinas en dotación destinados al manejo de elementos prefabricados pesados	30
6.5. Empleo de perfiles estructurales de fibra de vidrio como sustitutivo de la madera .	31
7. Conclusiones.....	32
8. Líneas futuras de trabajo.....	33
Bibliografía	34
ANEXO A. Cálculo de rendimiento en puesta en obra de un módulo MIL 1 5442 HESCO ...	40

ANEXO B. Encuesta sobre la situación actual de los medios de fortificación	41
B.1. Modelo de encuesta planteada al personal del BZ XII	41
B.2. Análisis de datos	42
B.3. Resultados extraídos de la encuesta al personal del BZ XII	43
ANEXO C. Determinación de necesidades a través de problemas mediante herramientas gráficas de Ingeniería de Calidad	44
C.1. Diagrama Ishikawa.....	44
C.2. Herramienta TRIZ.....	45
ANEXO D. Tecnologías de compactación y apuntalamiento del terreno	46
D.1. Tierra Armada	46
D.1.1. Proceso constructivo mediante la técnica de Tierra Armada.....	47
D.1.2. Principio de la Tierra Armada	47
D.2. Propuesta de empleo en obras de fortificación militar	49
D.3. Empleo de materiales compuestos en los medios de estabilización del terreno	49
ANEXO E. Tratamiento de protección de superficies mediante poliurea	54
E.1. Producto propuesto	54
E.1.1. Características generales más destacadas	55
E.1.2. Limitaciones del producto	55
E.1.3. Certificaciones y ensayos de producto	56
E.2. Procedimiento de aplicación sobre soporte metálico	59
E.2.1. Sistema de aplicación.....	60
ANEXO F. Ampliación de funciones de la retroexcavadora para su uso como grúa	61
F.1. Carga de trabajo admisible	61
F.2. Implementos para el izado de cargas	64
F.3. Resultados de experimentación en el BZ. XII	67
ANEXO G. Perfiles estructurales	69
G.1. Simulación por software para la comparación entre perfiles	69
G.2. Perfiles de aluminio	79
G.3. Perfiles de PVC reforzado con fibra de vidrio.....	81
ANEXO H. Investigación y uso de prefabricados en fortificación por otros Ejércitos.....	84
H.1. Estados Unidos	84
H.1.1. Barreras de protección modulares	84
H.1.2. Hormigones de alta resistencia	85
H.1.3. Sistemas de confinamiento celular de arena.....	86
H.1.4. Refugios y búnkeres prefabricados.....	89
H.2. Federación Rusa	90

H.2.1. Búnkeres prefabricados	90
H.2.2. Gaviones de la Federación Rusa	90
H.3. Reino Unido	91
H.3.1. Estructuras modulares	92
H.3.2. Gaviones de Reino Unido.....	92

Acrónimos y abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BRI	Brigada
BSI	<i>British Standard Institution</i>
BZ	Batallón de Zapadores
CERL	<i>Construction Engineering Research Lab</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CMC	Conglomerado Madera Cemento
COP	<i>Combat Outpost</i>
ERDC	<i>Engineer Research and Development Center</i>
FAS	Fuerzas Armadas
FCSE	Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado
FV	Fibra de Vidrio
GSL	<i>Geotechnical and Structures Lab</i>
GU	Gran Unidad
HRWRA	<i>High-Range Water-Reducing System</i>
HVM	<i>Hostile Vehicle Mitigation</i>
I+D+i	Investigación, Desarrollo e Innovación
ITM	Instituto Tecnológico de la Marañosa
KVS	<i>Komplekta Volnistoy Stali</i>
LITE	<i>Lightweight Individual Tactical Emplacement</i>
MAGCC	<i>Marine Corps Air Ground Combat Center</i>

MAVIS	<i>Magnetic Velocity Induction System</i>
NOC	Número OTAN de Clasificación
NOP	Norma Operativa
ORTE	Organización del Terreno
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PPT	Pliego de Prescripciones Técnicas
PVC	Policloruro de Vinilo
RDFW	<i>Rapid Deployment Fortification Wall</i>
RPC	<i>Reactive Powder Concrete</i>
STANAG	<i>Standardization Agreement</i>
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TRIZ	<i>Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach</i>
UFC	<i>Unified Facilities Criteria</i>
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
USA	<i>United States of America</i>
UV	Ultravioleta
VIED	<i>Vehicle Improvised Explosive Device</i>
WES	<i>Waterways Experiment Station</i>
ZO	Zona de Operaciones

Figuras

Figura 1: Barreras de hormigón. Fuente: www.militarymodelling.com	11
Figura 2: Gaviones. Fuente: www.gabionbarrier.com , elaboración propia	12
Figura 3: Contenedor de vida. Fuente: www.google.es	13
Figura 4: Refugio metálico. Fuente: Revista Ejército. Número extraordinario sobre Armamento y Material.	13
Figura 5: Objetivos de innovación. Fuente: elaboración propia	18
Figura 6: Spalling. Fuente: elaboración propia	19
Figura 7: Placas de material compuesto. Fuente: Jara Mori, G. (2008). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras. Universidad Politécnica de Madrid.	23
Figura 8: Flejes de material compuesto. Fuente: Jara Mori, G. (2008). [Ídem]	24
Figura 9: Transporte manual de placas. Fuente: Castro, A. Á., Rojas, F. B., Granda, J. L., Muñoz, B. O., & Cisneros, D. G. (2006).	25
Figura 10: Presión activa y presión pasiva. Fuente: www.enriquemontalar.com	26
Figura 11: Composición de la poliurea. Fuente: www.tecnopol.es	30
Figura 12: Comparación de daños sobre metales. Fuente: Inndeo Engineering	30
Figura 13: Comparación de impacto en bloque sin/con poliurea. Fuente: Inndeo Engineering	31

Tablas

Tabla 1: Elementos prefabricados en cada categoría. Fuente: elaboración propia	10
Tabla 2: Comparativa entre Hesco y Defencell. Fuente: elaboración propia	12
Tabla 3: Publicaciones estudiadas. Fuente: elaboración propia	15
Tabla 4: Problemas, propuestas de solución y requisitos. Fuente: elaboración propia	17
Tabla 5: Masa de fragmentos y valores medios de daño en muro tras detonación. Fuente: Dena Arto, Á. (2014). II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014. Ed. Centro Universitario de la Defensa,	22
Tabla 6: Datos necesarios para aplicar el método. Fuente: elaboración propia	25
Tabla 7: Ángulo de rozamiento interno. Fuente: NBE AE-88 Acciones en la Edificación (derogado)	27
Tabla 8: Comparativa entre perfiles. Fuente: elaboración propia	32

Introducción

La presente memoria corresponde a un Trabajo Fin de Grado del Grado en Ingeniería de Organización Industrial que se imparte en el Centro Universitario de la Defensa, centro adscrito a la Universidad de Zaragoza, ubicado en la Academia General Militar. Su propósito es el de proponer innovaciones en el campo de los materiales prefabricados de fortificación, alineadas con los intereses de las Fuerzas Armadas (FAS).

En el ámbito de la Alianza Atlántica se considera la fortificación como una de las tareas de Ingenieros que contribuyen a la supervivencia dentro del modelo OTAN de Protección de Fuerzas (1). El término fortificación se define como la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras e instalaciones, incluyendo la protección balística y contra explosiones. Por su parte, la fortificación de campaña se define como un emplazamiento o refugio de naturaleza temporal, que se puede construir con una razonable facilidad por las unidades y que requiere una participación menor de Ingenieros en cuanto a supervisión y equipamiento (2).

La moderna concepción de la fortificación de campaña, en cuanto a organización, funciones y materiales y equipos a emplear, se ha visto necesariamente influida por la evolución de la doctrina de la OTAN en el Arma de Ingenieros. La sustitución del enfoque estratégico basado en la defensa colectiva del territorio de la Alianza, de carácter estático, por el de operaciones expedicionarias, en teatros alejados, requiere de organizaciones más flexibles y medios y materiales más sencillos, ligeros y fáciles de transportar.

Por ello, la tendencia actual es el empleo cada vez mayor de medios prefabricados de fortificación. Estos elementos permiten la instalación rápida y sencilla de asentamientos fortificados, reduciendo los tiempos de ejecución y el personal necesario, y aumentando el grado de protección y supervivencia de las tropas. La creciente investigación en el sector hace que surjan continuamente nuevas tecnologías, técnicas y productos que se pueden utilizar y que se deberían evaluar con el fin de conocer las mejores opciones disponibles en el mercado y, si procede, actualizar los medios y materiales en uso.

Objetivos y metodología

El objetivo de este trabajo es el de identificar tecnologías emergentes o productos novedosos que puedan sustituir o complementar a los medios actuales, aumentando las capacidades de las Unidades de Ingenieros en tareas de fortificación.

Para tal fin, se ha realizado un análisis de la situación actual de los medios de fortificación, mediante la revisión de los manuales y documentación técnica a disposición de las FAS, y del contacto con las empresas proveedoras del Mando de Apoyo Logístico del Ejército.

Posteriormente, se han definido las carencias y necesidades de las Unidades, extraídas de los problemas detectados en las obras de fortificación, para lo cual se ha explotado la amplia

experiencia del personal del Batallón de Zapadores XII. Las herramientas empleadas en este proceso han sido la lluvia de ideas, el planteamiento de encuestas, y el análisis de problemas específicos mediante el Diagrama de Ishikawa¹ y la herramienta TRIZ². Además, para completar la información extraída de la citada Unidad, se ha realizado una búsqueda y análisis de varias publicaciones doctrinales nacionales y extranjeras. Una vez conocidas las debilidades y fortalezas de los medios actuales, así como las necesidades de la Unidad, pueden definirse requisitos a satisfacer por los nuevos medios, tecnologías o técnicas.

La metodología seguida para identificar las innovaciones que mejor satisfagan los requisitos de las Unidades se basa en una prospectiva tecnológica centrada en las bases de datos militares de los principales centros de investigación de diversos ejércitos extranjeros, así como en una revisión de las actuales líneas de investigación de las FAS, mediante el estudio de las publicaciones de diversos centros nacionales de I+D+i. Asimismo, se ha estudiado la posible aplicación de tecnologías de uso civil y su adaptación a los objetivos del Ejército de Tierra. Como producto final, se obtiene una relación de tecnologías y productos novedosos que permiten cubrir carencias existentes y aumentar las prestaciones de los medios en dotación.

En un principio, se ha considerado la posibilidad de realizar un análisis coste-calidad de los materiales. Sin embargo, debido a que las adquisiciones de estos medios se llevan a cabo a través de los organismos de la OTAN, y el carácter clasificado de esta documentación, se ha descartado.

Situación actual de los medios de fortificación prefabricados

En este punto se identificarán los medios prefabricados de uso común. Para tal fin, se dividirá una obra de fortificación tipo en áreas, según la función que cumplen (protección perimetral, elementos elevados y enterrados) y se definirán los materiales empleados en cada categoría. Aquellos materiales que se repitan entre dichas categorías se considerarán como comunes en obras de fortificación.

1.1. Configuración de las obras de fortificación

Debido al carácter cambiante de las misiones de las FAS, cada obra tiene una configuración única y se emplean medios específicos. Sin embargo, es posible identificar características comunes entre ellas. Las obras de fortificación actuales se dividen, de forma general, en los siguientes trabajos (3):

- a. Protección perimetral: muro de protección contra explosiones adyacentes, que podrá coronarse con una valla anti-granadas. Los materiales empleados en este trabajo son

¹ Diagrama de espina de pez. Permite desgranar un problema general, del cual no es posible distinguir una solución clara, en causas específicas, a las cuales se puede encontrar una solución técnica.

² También llamada "Teoría para Resolver Problemas de Inventiva". Partiendo de la premisa de que los problemas se repiten en diversas áreas de la ciencia y la industria, el escritor G. Altshuller (1999) creó un sistema de identificación de soluciones técnicas generales, cuyas entradas son problemas de carácter general.

diversos, combinando medios de contramovilidad, tales como la alambrada rápida o concertina con las barreras prefabricadas de hormigón armado y los gaviones.

- b. Elementos de protección elevados: existirán torres de vigilancia, construidas con gaviones en su base y estructura de madera. Como área de vida se construyen barracones mediante contendores.
- c. Elementos de protección enterrados: refugios para personal, puestos de mando, transmisiones o asentamientos para vehículos en terreno excavado, normalmente mediante medios mecánicos.

1.2. Materiales y medios prefabricados usados en fortificación

La Tabla 1 muestra los elementos prefabricados que se emplean en la actualidad en cada una de las categorías descritas anteriormente..

PROT. PERIMETRAL	ELEM. ELEVADOS	ELEM. ENTERRADOS
Barreras tipo Bremer (T-wall)	Contenedores	Refugios metálicos
Barreras tipo Jersey (vehicular)	Gaviones	Gaviones
Muros de bloque de hormigón	Madera	Madera

Tabla 1: Elementos prefabricados en cada categoría. Fuente: elaboración propia

Una Sección de Zapadores dispone de medios limitados de fortificación en dotación. Las Normas Operativas del BZ XII establecen que se dispondrá de refugios metálicos, sacos terreros, así como tablonés de madera, y gaviones de tipo Hesco-Bastion (con enrejado metálico exterior) o tipo Defencell (sin elementos metálicos y de menor tamaño).

Las Unidades de Especialidades de Ingenieros disponen en dotación de medios mecánicos especializados, tales como grúas, que permiten el uso de materiales de mayor masa y entidad, como prefabricados de hormigón armado o acero, contendores o estructuras de viga metálica. A diferencia del caso anterior, no existe una tendencia a la estandarización en estos materiales, siendo definidas sus características de forma particular en cada obra.

Es una práctica común adquirirlos para trabajos específicos, sin que exista unidad doctrinal al respecto. No obstante, pueden señalarse como de uso común los siguientes.

1.2.1. Barreras de hormigón armado prefabricadas (protección perimetral)

Han sido empleadas en el ámbito militar, y también en el civil, para protección de instalaciones industriales o en la construcción de carreteras. Se fabrican en la Zona de Operaciones (ZO) por la industria local. Existen los siguientes tipos.

- a. Muros tipo Bremer: Se utilizan para fortificar el perímetro de una posición. Tienen forma de T invertida con una altura superior a los 4 m (4). Su instalación precisa de una grúa. También son denominados "barrera Alaska".
- b. Barreras tipo Jersey: se emplean en las entradas para vehículos con objeto de crear obstrucciones al tráfico. Su altura es próxima al metro, y se caracterizan por la forma trapezoidal de su base. El ángulo de inclinación de la misma está calculado para permitir que las ruedas de un vehículo en colisión se eleven, desviándose de su trayectoria. Una barrera Jersey estándar tiene una altura de 0,8 m; y su superficie inferior, un ángulo de 55° respecto de la horizontal (5). Incluyen dos o más arcos

metálicos en su superficie superior, para permitir ser elevadas mediante medios mecánicos.

- c. Muros de bloque de hormigón: son empleados en muros perimetrales. Son construidos a partir de bloques de hormigón unidos con mortero, pudiendo ser armados con barras de acero en su interior. Estos bloques se comercializan en diferentes tamaños.



Figura 1: Barreras de hormigón. Fuente: www.militarymodelling.com

1.2.2. Gaviones (protección perimetral, elementos enterrados y elevados)

Actualmente se emplean dos tipos de gaviones: Hesco-Bastion, que cuentan con un enrejado metálico exterior y son empleados fundamentalmente como elemento de protección para el perímetro de las bases; y Defencell, de menor tamaño y sin elementos metálicos, utilizados tanto como protección perimetral como en aplicaciones específicas.

Los gaviones Hesco-Bastion (Figura 2) son estructuras de enrejado metálico de acero galvanizado, con una cobertura interior de geotextil de polipropileno de alta resistencia³ ante esfuerzos de tracción. Estas estructuras se rellenan de tierra, para emplearse en fortificación u obra civil. La configuración habitual de los muros perimetrales erigidos con gaviones es en doble o triple altura, alcanzando una cota de entre 2,5 a 3 m, con una base de 2 m de anchura. (6)

En la actualidad se emplea el gavión MIL 1 5442 de la empresa Hesco, con NOC 5680-99-001-9396 (7). Está constituido por nueve celdas de 1,37 m x 1,06 m x 1,06 m (8). Su masa en vacío es de 149 kg. Su instalación puede ser manual, pero resulta más rentable empleando maquinaria⁴.

El grado de protección que ofrece una barrera construida con gaviones Hesco-Bastion depende de su configuración (anchura y altura), de la composición del relleno, y del ángulo de impacto sobre su superficie (en caso de proyectil o vehículo).

El gavión tipo Defencell es menos habitual que el de los convencionales Hesco-Bastion, pero ofrece prestaciones complementarias a éste. Se emplea en barreras perimetrales, compartimentación del terreno, puntos de entrada controlados con obstáculo vehicular,

³ Se define como geotextil aquellos materiales textiles planos, permeables y poliméricos, que se emplean en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas. En función de la luz entre las fibras, permite separar materiales de diferentes granulometrías, además de cumplir una función drenante. (77)

⁴ De acuerdo con el Anexo A, puede rellenarse en 3,84h sin el empleo de medios mecánicos. En cambio, el tiempo empleado en rellenar un módulo si se dispone de una retroexcavadora es de 0,23h.

estabilización del terreno y protección ante inundaciones. Su principal diferencia con los Hesco-Bastion es su menor tamaño y la carencia de enrejado metálico. El modelo empleado por las Unidades de Ingenieros es el Defencell DT1.

Presentan una configuración interna triangular (Figura 2). El tipo de geotextil que emplea es un polímero reticulado no orientado, lo cual logra que los orificios producidos por los proyectiles y los efectos de las explosiones quedan localizados en la zona de impacto, sin que el textil se rasgue ampliamente (*Military Systems & Technology, 2015*). Además, son óptimos para elaborar barreras HVM (*Hostile Vehicle Mitigation*), así como para ser transportados por un combatiente a pie en su mochila, en un formato conocido como LITE, y servir como protección para una posición individual de tiro, en sustitución de los sacos terreros (a modo de ejemplo, el módulo LITE permite erigir una pared de 3,2 x 0,6 x 0,7 m, dimensiones equivalentes a 100 sacos terreros). (9)

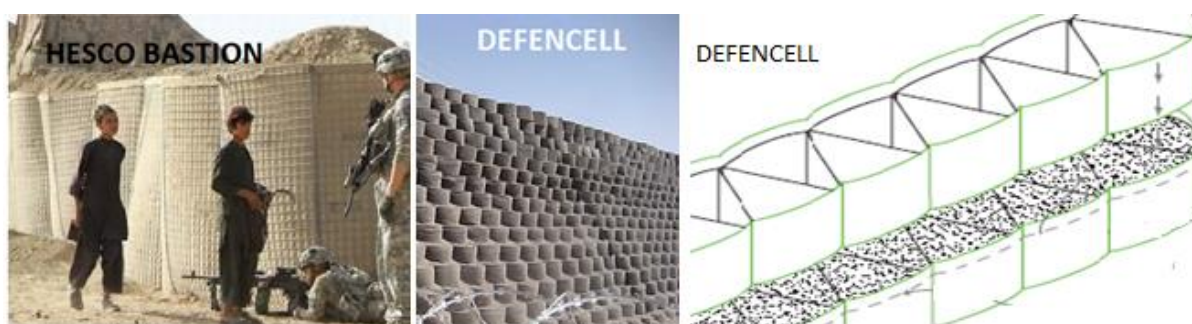


Figura 2: Gaviones. Fuente: www.gabionbarrier.com, elaboración propia

En la Tabla 2 se comparan ambos tipos de gaviones.

HESCO-BASTION	DEFENCELL
Mayor tamaño de muro obtenido por módulo, apto para barreras perimetrales de grandes dimensiones	Menor tamaño de celdas, apto para barreras reducidas o vehiculares.
Contiene elementos metálicos.	No contiene elementos metálicos. Menor posibilidad de rebotes. Apto para protección individual de tiradores.
Elevado peso por módulo. Necesita transporte motorizado.	Peso reducido, lo que hace posible su transporte por un combatiente a pie.
Escaso rendimiento de llenado sin medios mecánicos.	Posibilidad de llenado manual, debido a su volumen reducido.
Cada celda es separable y puede emplearse de forma individual.	Las celdas se encuentran cosidas, el módulo solo puede emplearse completo.

Tabla 2: Comparativa entre Hesco y Defencell. Fuente: elaboración propia

1.2.3. Contenedores (elementos elevados)

Los contenedores empleados por las FAS proceden principalmente de las casas Corimec o Arpa. Se emplean como dormitorio, cocina, oficina o aseo, además de como medio de almacenaje. Sus dimensiones, poniendo como ejemplo el contenedor ARPA de tipo dormitorio, son de 6,058 x 2,438 x 2,591 m una vez montado (10). Resulta de interés para el presente estudio analizar el techo y paredes de los mismos, por ser las superficies expuestas

a las inclemencias climatológicas y a los efectos de posibles ataques. Los montantes (estructura portante) consisten en cuatro pilares estructurales, y la estructura perimetral está formada por perfiles de acero conformado en frío y pregalvanizado. Estos perfiles sostienen entre sí los paneles que constituyen los cerramientos. El techo es de panel tipo “sándwich” modular, constituido por dos chapas (interior y exterior) de acero, galvanizadas y pintadas, con un espesor mínimo (en limpio) de 0,5 mm, y un alma intermedia de poliuretano expandido con una densidad media de 40 kg/m³. Las paredes son de composición similar, y cuentan con una o dos ventanas compactas preinstaladas. Junto con los contenedores en sí mismos, es necesario el empleo de numerosas estructuras prefabricadas, tales como escaleras o techados. (11)



Figura 3: Contenedor de vida. Fuente: www.google.es

El uso de contenedores de vida ha sido habitual en las operaciones en el extranjero de las FAS. Su empleo habitual es en uno o dos niveles, formando barracones perpendiculares a un pasillo central, con un contenedor de ablución (e.g. Destacamento de Dalovica o Cuartel General de Pristina, Kosovo). Estos contenedores se encuentran protegidos contra incendios (12) (13). Sin embargo, su protección

balística es muy limitada, así como su resistencia a los efectos de detonaciones, tanto a sobrepresión como a proyecciones. Es necesario protegerlos mediante gaviones o sacos terreros para asegurar la supervivencia del personal en caso de detonaciones próximas o impactos de proyectiles de fusilería.

1.2.4. Refugio metálico (elementos enterrados)

Se trata de estructuras metálicas semicirculares, unidas entre sí mediante pernos. Su montaje es manual, y pueden encontrarse en superficie o enterrados total o parcialmente. La luz es de 4,28 metros y la longitud estará en función del número de elementos empleados. El material empleado es chapa ondulada de espesor ≥ 4 mm, con corrugación MP-200, longitud de onda 200 ± 5 mm y altura de onda de 55 mm. El extremo inferior dispone de un patín que permite un mejor asiento sobre el terreno. Cada estructura metálica semicircular empleada tiene una masa de 143 kg.

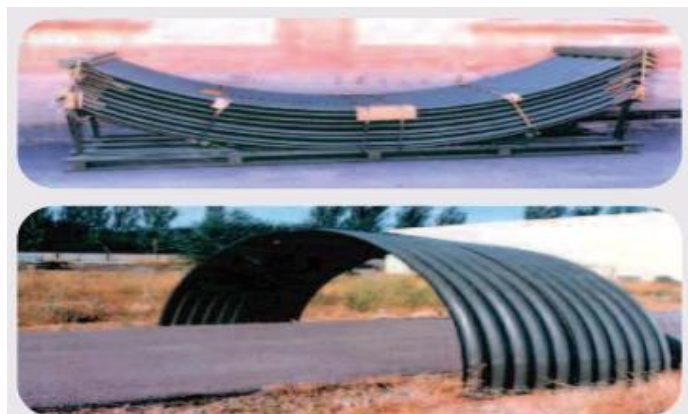


Figura 4: Refugio metálico. Fuente: Revista Ejército. Número extraordinario sobre Armamento y Material.

Estudio de las necesidades de las Unidades en materia de fortificación

Explotando la experiencia personal en ZO de los miembros del BZ XII, se han establecido las carencias de la Unidad en materia de fortificación y los puntos débiles de los medios actuales. Posteriormente, a través del análisis de las principales publicaciones doctrinales, se han determinado objetivos de mejora, a fin de elaborar un cuadro de necesidades, que posteriormente se ha traducido en requisitos de los nuevos materiales.

1.3. Entrevistas con el personal del BZ XII

Las entrevistas al personal del BZ XII se han centrado en aquellos que han participado en misiones en el extranjero. Se ha planteado como fin de las mismas discernir cuáles son los principales problemas o modos de fallo observados en los materiales y medios actualmente empleados. Para alcanzar el objetivo propuesto, se ha entrevistado de forma individual a cada individuo, y se ha planteado una batería de preguntas de respuesta abierta. Todo este proceso puede consultarse en el Anexo B de esta memoria, donde se recoge el análisis de datos de la encuesta.

Los resultados extraídos en este punto son los siguientes:

- I. A menudo se emplean elementos prefabricados de hormigón en trabajos relacionados con drenajes o canalizaciones para flujos de agua. El BZ XII ha instalado cilindros de hormigón en su reciente obra de fortificación en la Base "El Goloso". Es común que en el manejo de dichos elementos se deterioren o fracturen. Por tanto, se detecta el problema de que las actuales técnicas o medios de manipulación de los elementos prefabricados de hormigón provocan el deterioro de los mismos.
- II. Las obras realizadas con madera presentan múltiples problemas: estructurales, filtraciones de agua, humedades, plazos de ejecución elevados y necesidad de herramienta específica. Las cubiertas de madera tienen una masa elevada y precisan de estructuras portantes de cierta entidad para asegurar su resistencia.
- III. Partiendo de la generalización de que todos los trabajos de fortificación implican excavación y trabajo subterráneo, no existe material apropiado en dotación para cometidos como apuntalamiento o refuerzo estructural de taludes excavados, debiendo realizarse con madera o chapa metálica cortada *in-situ*. La no estabilización de los suelos provoca diversos problemas, entre los cuales destaca la falta de seguridad derivada de trabajar bajo el nivel del suelo en terrenos inestables.
- IV. Uno de los medios más empleados en campamentos semi-permanentes, los contenedores de vida, no cuentan con protección balística de ningún tipo.

Cabe señalar que el personal se encuentra más centrado en los aspectos del material relacionados con las propias operaciones de construcción, que con su desempeño final.

1.4. Estudio de la doctrina española y OTAN relativa a fortificación

Se han estudiado las publicaciones que figuran en la Tabla 3, obteniéndose los resultados enumerados a continuación.

Manual OR-409: ORTE para el combate de GU,s	Completo
USA Army Engineer School. (2005). Field Fortifications (Ed. C). Fort Leonard Wood.	Cap. 1 a 4
Hesco Bastion Ltd, Dubova, M., McBarnet, D., & LLewelyn, M. (2016). Advanced Military Frontline Fortification and Barrier Solutions. Global Business Media, Special Report	Completo

Tabla 3: Publicaciones estudiadas. Fuente: elaboración propia

- I. Las publicaciones doctrinales, así como las NOP de las Unidades (cuya fuente es la experiencia), muestran la carga en tiempo y recursos que suponen los trabajos de refuerzo estructural de las excavaciones, superando ampliamente al de la propia realización de la excavación. A modo de ejemplo, basándose en un abrigo de pelotón tipo, reflejado en la NOP-307-13 de la BRI XII, un refugio tipo ocupa un volumen de 90 m³ y el tiempo de excavación es de una hora y media en terreno suelto (mediante maquinaria específica, como retroexcavadora). Seguidamente, se lleva a cabo la construcción de la cubierta del refugio con madera, cuya masa son 7,5 t, en un tiempo estimado de 4 horas (realizado por una sección reforzada con medios de excavación y carga). La realización de la cubierta en madera precisa de una sección de trabajadores, así como del apoyo de maquinaria, y tiene un plazo de ejecución muy superior
- II. No existe estandarización en lo referente a materiales prefabricados de fortificación. Destaca el caso de las vigas de madera, las cuales se emplean en formatos sin normalizar, con lo cual no se conocen con precisión sus propiedades.
- III. Los manuales de fortificación aún contemplan el uso masivo de la madera⁵ para la realización de cubiertas o estructuras portantes, y estos manuales no contemplan los materiales innovadores y de mejores prestaciones.
- IV. Artículos académicos diversos mencionan el fenómeno llamado *spalling*, o proyección de fragmentos de hormigón en detonaciones cercanas a muros, como efecto nocivo contra personal. (14) Este efecto tiene lugar cuando se supera la resistencia a tracción de un material, produciendo una exfoliación de la zona sometida a un esfuerzo máximo, que en este caso es la cara de la barrera opuesta a la detonación. En una detonación, dada la magnitud de la energía potencial, las partículas proyectadas cuentan con una elevada energía cinética. Se proyectan escombros de elevada masa a corta distancia y pequeños fragmentos a gran velocidad, siendo estos los más peligrosos.

⁵ “La madera se usa de forma general como soporte estructural para una posición defensiva” (USA Army Engineer School, 2005) a la hora de elaborar cubiertas o cualquier tipo de refugio enterrado (OR-409)

Relación de necesidades de las Unidades deducidas a través de los problemas detectados

Una vez detectados los principales problemas, se proponen soluciones a los mismos. De estas propuestas han derivado uno o más requisitos de innovación, que han sido la guía para la prospectiva tecnológica llevada a cabo en este trabajo.

Se ha analizado el caso concreto del deterioro de elementos prefabricados mediante la aplicación de un diagrama Ishikawa, llegando a la conclusión de que es debido al uso de maquinaria no específica. La herramienta TRIZ arroja la posibilidad de ampliar las funcionalidades de una máquina de excavación en dotación para emplearla como grúa. El Anexo C de esta memoria desarrolla dicho análisis.

PROBLEMA DETECTADO	PROPUESTA DE SOLUCIÓN	REQUISITO DE LA INNOVACIÓN PROPUESTA
Las barreras de hormigón provocan proyecciones en caso de detonaciones próximas	Mejorar las barreras prefabricadas de hormigón	Reducción de las proyecciones
		Mantener o mejorar la resistencia al punzonamiento ⁶
Se trabaja en excavaciones con taludes sin apuntalar y terrenos inestables, lo que conlleva falta de seguridad	Buscar técnicas de estabilización del terreno y apuntalamiento sencillas y con materiales reducidos, que sea posible realizar con personal no especializado	Sin necesidad de análisis de suelos en laboratorio
		Prestación complementaria: estabilización de terreno arenoso frente al viento
Los contenedores de vida están desprotegidos frente a los impactos de bala o metralla	Definir un tratamiento de protección aplicable sobre los actuales contenedores	Aplicable sin necesidad de sustituir piezas de los actuales contenedores
		No debe modificar las condiciones actuales de vida ni el aspecto interior
Los elementos prefabricados sufren deterioros al manipularse en las obras	Ampliar las funciones de la maquinaria actual, de forma que permita, de manera complementaria, realizar tareas de elevación y manipulación de cargas	Acoplable a la retroexcavadora en dotación sin necesidad de realizar modificaciones en la misma
		Disponibile en el mercado
Problemas derivados del uso de la madera, como fallos estructurales, problemas con la humedad y elevado peso	Sustitución de los tablones de madera por perfiles comerciales de materiales de menor peso y mejores características mecánicas	Menor peso de los perfiles
		Características mecánicas iguales o superiores
		Mejor comportamiento frente a la humedad

Tabla 4: Problemas, propuestas de solución y requisitos. Fuente: elaboración propia

⁶ Tiene lugar cuando se producen esfuerzos axiales excesivamente concentrados sobre el elemento flexionado, y produce fisuras en el mismo. En las barreras de hormigón, tiene lugar frente a impactos de proyectiles. Los elementos de hormigón armado sometidos a punzonamiento suelen contar con una armadura específica para soportar este tipo de solicitaciones.

Innovaciones propuestas ante los problemas detectados

Las innovaciones a continuación señaladas se han centrado en resolver los problemas detectados. A fin de guiar la prospectiva realizada, se han seleccionado aquellas tecnologías, técnicas y productos que mejor satisfacen las necesidades expresadas con anterioridad, cumpliendo los requisitos planteados en este TFG. En la Figura 5 se presenta un esquema de este apartado que recoge las innovaciones propuestas para cada uno de los problemas detectados.



Figura 5: Objetivos de innovación. Fuente: elaboración propia

1.5. Mejora de las barreras prefabricadas de hormigón

El análisis de documentos OTAN destaca la importancia de los prefabricados de hormigón en la protección perimetral de las posiciones defensivas. Se ha detectado como principal carencia en los mismos el llamado *spalling*, o proyección de fragmentos de hormigón a gran velocidad. Este fenómeno consiste en la ruptura de la superficie del muro contraria a la detonación, y la proyección de pequeños fragmentos. Las proyecciones de fragmentos primarios tras una explosión pueden ser potencialmente tan peligrosas como la propia onda de choque de la detonación, y es un efecto documentado en diversas normas y reglamentos españoles⁷ (15). Se proponen las siguientes soluciones.

⁷ El Real Decreto 563/2010, por el que se aprueba el Reglamento de Artículos Pirotécnicos y Cartuchería, establece normativa para las instalaciones de almacenaje de artículos explosivos. En él se determina que los materiales de las defensas de dichas instalaciones serán ligeros, que minimicen las proyecciones de forma que se reduzca el mínimo posible los lanzamientos de fragmentos primarios de una explosión.

1.5.1. Revestimientos mixtos de alto coeficiente de absorción acústica

El *spalling* es consecuencia de la propagación de la onda de choque a través del hormigón, cuyo bajo coeficiente de absorción y elevada inelasticidad⁸ impiden la absorción de la onda por el propio material. Las ondas incidentes sobre la superficie exterior se propagan sin apenas disiparse hacia la cara interior. Cuando alcanzan la superficie opuesta, la energía transmitida por la onda provoca que las partículas que componen dicha cara interior resulten fragmentadas y adquieran elevada velocidad (16). Dado este principio, se ha determinado que el empleo de un recubrimiento que absorba la onda de sobrepresión, e impida su transmisión a la barrera, disminuirá la fragmentación de la misma. Al objeto de hallar el material idóneo para dicho recubrimiento, se ha equiparado el coeficiente absorción de dicha onda de presión con la absorción de una onda acústica. Esta asimilación es posible desde un punto de vista mecánico, pues ambas ondas son similares, dado que las dos generan una variación local de presión o densidad y se transmiten de forma esférica. (17)

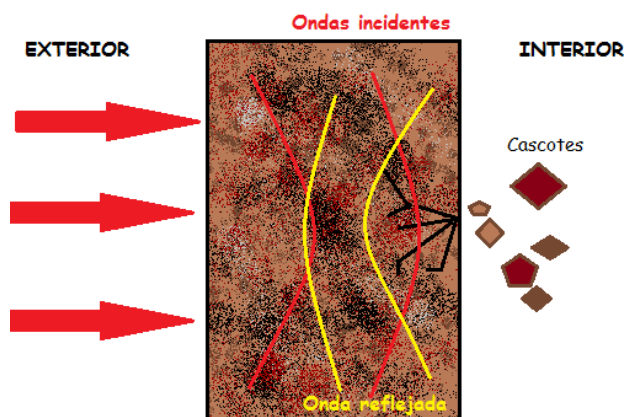


Figura 6: *Spalling*. Fuente: elaboración propia

Se ha centrado la prospectiva tecnológica sobre materiales empleados en revestimientos acústicos en obra civil. Entre ellos, se ha seleccionado el Conglomerado Madera-Cemento (CMC), por haber sido empleado con anterioridad para la protección de instalaciones de las FCSE.

Este trabajo propone revestir las barreras de hormigón de CMC, cuya composición incluye viruta de madera reciclada mineralizada. El CMC surge como medio para crear barreras acústicas, por lo que su coeficiente de absorción sonora es

elevado. Se propone emplear una capa central de hormigón armado estructural, seguida de una capa de paneles prefabricados de CMC, debido a que su resistencia mecánica no es tan elevada como la del hormigón armado⁹. Este absorbe la onda de sobrepresión, como lo haría si se tratase de una onda sonora, reduciendo el efecto de la misma sobre la barrera. Se estima como necesaria una presión puntual de 1,21 MPa para romper el hormigón. En ensayos donde se ha revestido la citada estructura con CMC, dicha cifra se eleva hasta los 2,75 MPa. (18)

Para este trabajo, se ha contactado con la empresa Eco Haus, especializada en edificación con prefabricados compuestos de madera mineralizada y hormigón, con el nombre comercial de Cimablock. Su proceso constructivo emplea placas de CMC como encofrado perdido para la construcción de muros de hormigón y como base de encofrado para el forjado.

⁸ La velocidad de propagación de una onda longitudinal en un sólido depende del módulo de Young del material y de su densidad.

⁹ La EHE-2008 (Instrucción de Hormigón Estructural) establece como resistencia mínima de proyecto una f_{ck} superior a $2 \cdot 10^7$ N/m², mientras que los proveedores de CMC (ej: Climablock®) plantean una resistencia mecánica del mismo inferior a 10^4 N/m².

1.5.2. Fórmulas de hormigones de alta densidad y elevada ductilidad

Existen hormigones de altas prestaciones en el mercado con potencial para mejorar la resistencia de las barreras de hormigón, tanto frente a detonaciones como ante impactos de proyectiles, conocidos como *Ultra High Performance Concrete* (UHPC). Uno de ellos es el RPC (*Reactive Powder Concrete*). Desarrollado en Francia en 1990 (19), este material contiene cemento, arena, polvo de cuarzo y microsílíce, así como fibras de acero y aditivo superplastificador. Esta composición da como resultado una microestructura optimizada con una alta densidad (empleo de arena de granulometría inferior a 600 μm y de microsílíce como relleno o *filler*). Este tipo de formulaciones presentan resistencia a la tracción de entre un 20% a un 50% superior a las fórmulas convencionales. El uso de plastificantes permite obtener los mejores resultados (20). En el proceso de elaboración de los prefabricados mediante RPC se somete el material a alta presión y temperatura, acelerando así la reacción puzolánica. Por último, se le añaden fibras metálicas para incrementar su ductilidad. Sus aplicaciones actuales son diversas, fundamentalmente en construcción y como contenedor de residuos radiactivos, debido a su baja permeabilidad. Con estas formulaciones de alta calidad, puede alcanzarse una resistencia a la compresión de incluso 200 MPa. (21)

Se trata de un material con un gran potencial en obras de fortificación. En primer lugar, posee una gran resistencia a la penetración, lo cual lo hace óptimo ante ataques mediante armas de tiro tenso. En un reciente estudio de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Nanjing (China), se llevó a cabo la búsqueda experimental de un modelo para predecir la penetración de un proyectil en el RPC en diversas condiciones de temperatura, velocidad o masa del mismo. Como resultado, se obtuvo la conclusión de que la resistencia a la penetración del RPC es tres veces superior a la del hormigón de uso general. (22)

Por otro lado, es de interés la investigación llevada a cabo por el *Engineer Research and Development Center* de los Estados Unidos sobre hormigones de altas prestaciones. Las fórmulas empleadas por este centro presentan una resistencia a la compresión superior a 150 MPa, y contienen altas proporciones de aglutinantes, con un ratio de agua/cemento muy bajo. Pueden además contar con un aporte en su interior de fibras como refuerzo a tracción (23). Existen desarrollos civiles de esta tecnología, como el Ductal[®], así como ensayos militares con estos hormigones. En el Anexo H.2 de la presente memoria se presenta un desarrollo en mayor profundidad de estos productos.

La fabricación de barreras tipo Bremer mediante este material aportaría mayor seguridad ante ataques explosivos o con arma de fuego. En combinación con la tecnología de recubrimiento expuesta en el punto anterior da lugar a una barrera de protección de altas prestaciones. Por otro lado, encontramos que la limitación fundamental del RPC es su alto coste, por lo cual puede priorizarse su uso en zonas de especial riesgo, o emplearse como alternativa la tecnología de revestimiento mediante CMC citada anteriormente.

1.5.3. Refuerzo superficial mediante polímeros reforzados con fibra de carbono

Existen una amplia variedad de aditivos para hormigón basados en fibras de diversos materiales (fibra de vidrio, de polipropileno, nylon, Kevlar[®], etc.). Su uso está relativamente extendido en la actualidad, tanto en el ámbito civil como militar, y no tiene un carácter innovador. Sin embargo, existen tecnologías emergentes relacionadas con las fibras como

refuerzo a tracción que resultan de interés para este estudio por no ser empleadas como aditivo, sino como recubrimiento, posterior al forjado del hormigón. Por tanto, pueden aplicarse sobre las barreras existentes.

Una de ellas es el refuerzo externo de estructuras mediante polímero reforzado con fibra de carbono. Se trata de una técnica basada en introducir anclajes en pequeñas perforaciones en la barrera, unidos entre sí mediante hilos pretensados y una lámina en íntimo contacto con la misma, empleando como material CFRP (polímeros reforzados de fibra de carbono). En Chile ya se ha empleado CFRP aplicado de forma externa (como láminas y cordones) en zonas de riesgo sísmico, para reforzar o reparar muros de albañilería ante esfuerzos cíclicos de corte en el plano del muro, propios de un terremoto (24). Se diferencia del revestimiento de CMC en que basa su eficacia en su resistencia a tracción. Por tanto, no busca minimizar la transferencia de la onda de presión a la barrera, sino mantener cohesionada la superficie de la barrera, impidiendo que los fragmentos escindidos sean proyectados.

Recientemente, el Instituto de Ingeniería de Missouri, en colaboración con el U.S. *Army Engineer Research and Development Center* (ERDC), ha planteado la posibilidad de emplearlo como refuerzo exterior para la superficie de edificios amenazados por ataques con artefactos explosivos. Esta colaboración ha engendrado una tecnología para aumentar la resistencia del hormigón ante detonaciones. El proceso completo consta de la aplicación de un polímero CFRP sobre la superficie del hormigón, en forma de lámina, cuya adherencia a la estructura aumenta mediante el uso de anclajes diseñados específicamente para este fin (25). En artículos posteriores, se definen las consideraciones de diseño de dichos anclajes para mejorar la resistencia de la unión entre ambos materiales ante grandes tensiones. Los ensayos muestran que el empleo de numerosos anclajes de reducido tamaño distribuidos sobre la superficie produce mejores resultados (26) que las técnicas de unión tradicionales (adhesivos, remaches, etc.). Como refuerzo adicional, plantea el añadido de placas metálicas sobre la estructura, para mejorar el desempeño del conjunto. Esta tecnología tiene amplias aplicaciones militares, como método de refuerzo de estructuras ya existentes en ZO, o como sistema de reparación de prefabricados de hormigón dañados.

6.1.4. Tratamientos de refuerzo anti-fragmentación en muros de bloque de hormigón prefabricado

El uso más común del hormigón en prefabricados es en forma de bloques, unidos con mortero para levantar muros. Este material también produce el anteriormente mencionado problema ante detonaciones próximas, provocando la proyección de fragmentos a alta velocidad que actúan como metralla. Este efecto se intensifica en caso de existir alicatados o revestimientos estéticos.

A diferencia de las barreras prefabricadas, en las cuales se puede incluir de fábrica una capa exterior de protección contra fragmentos, los muros de bloque de hormigón son construidos sobre el terreno mediante bloques, como si de un muro de ladrillo se tratara, y es necesario hallar un tratamiento que pueda aplicarse con posterioridad a su construcción. Es decir, la técnica mencionada en el punto anterior, que precisa de perforaciones precisas y de una gran superficie de lámina de protección, es demasiado compleja para llevarse a cabo

sobre el terreno por personal no especializado. En su lugar, se escoge un tratamiento basado en los mismos principios, pero mucho más sencillo de aplicar.

Se plantea como solución la aplicación de mallas de revestimiento. En el Instituto Tecnológico La Marañosa se ha ensayado un revestimiento exterior con malla metálica perforada, con una luz del 7,5% (Modelo *Ambasciata* de Italfilm), y un revestimiento exterior adhesivo de fibra de vidrio (*Mape Wrap* de Mapei) o de fibra de basalto. Para los ensayos planteados, se construyeron muros con bloque de hormigón prefabricado 40x20x20 cm y se sometieron al efecto de cargas moderadas en detonación próxima (27). Se observó que en el caso de cargas moderadas, en el que no pelagra la integridad del muro, la principal causa de daños personales es el *spalling* o ruptura de la superficie. En el ensayo se evaluó tanto el daño sufrido por la pared expuesta (mediante medidas puntuales de la variación del índice de rebote del hormigón antes y después de la detonación) como la cantidad de fragmentos proyectados. La Tabla siguiente muestra los resultados:

Ensayo	Solución	Fragmentos (kg)	Alicatado (kg)	Enfoscado (kg)	Daño: valor medio
MF1 -A	Desnudo	63.4	56.6	6.8	9.4%
MF1 -B	Malla metálica exterior	39,5	37.4	2.0	7.8%
MF2 -A	Adhesivo fibra de vidrio exterior	24,8	23.5	1.3	9.2%
MF2 -B	Malla fibra basalto interior	1.7	0.8	0.9	14.5%

Tabla 5: Masa de fragmentos y valores medios de daño en muro tras detonación. Fuente: Dena Arto, Á. (2014). II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014. Ed. Centro Universitario de la Defensa, (Ensayo de soluciones constructivas para mejorar la seguridad de muros de fábrica frente a explosiones), 183–191. Retrieved from cud.unizar.es

Los experimentos, realizados en el Instituto Tecnológico de la Marañosa (ITM) muestran que los revestimientos interiores, como la malla de fibra de basalto adherida al muro, reducen la proyección de fragmentos potencialmente peligrosos para el personal.

1.6. Sistemas de refuerzo de taludes, compactación del terreno y mejora de obstáculos naturales mediante el uso de prefabricados

Tal y como se ha podido deducir del estudio de las publicaciones doctrinales de Ingenieros, es común en las obras de fortificación el enterramiento parcial o total de vehículos, refugios y puestos de mando. Unas condiciones deficientes del terreno, el tránsito de vehículos pesados, el desplome de los taludes durante la construcción, o el impacto de proyectiles explosivos en las inmediaciones de estas excavaciones pueden suponer un grave riesgo para el personal y los medios. Por ello, han de considerarse las ventajas de disponer de sistemas que permitan la estabilización y apuntalamiento del terreno. Su uso está intrínsecamente relacionado con los medios prefabricados, dado que gran parte de los mismos se emplean enterrados total o parcialmente.

1.6.1. Estabilización mecánica del terreno mediante medios fabricados en materiales compuestos

En la actualidad, debido al empleo poco habitual de apuntalamientos en obras de fortificación, no existe material en dotación para este fin, y no se instruye al personal en lo relativo a técnicas de apuntalamiento. Este TFG propone, a partir del método de la Tierra Armada, el empleo de medios fabricados en materiales compuestos para construir “muros armados”. Dado que las obras de Zapadores tienen un carácter expedito y no se dispone de medios de análisis de suelos, necesarios para realizar cálculos geotécnicos complejos, se ha desarrollado en este trabajo un método de cálculo de muros armados simplificado.

1.6.1.1. Tierra armada

La tecnología de la Tierra Armada consiste en la estabilización mecánica de un terraplén por medio de la inclusión de tiras metálicas, las cuales refuerzan el suelo por el efecto de interacción que se genera entre ambas superficies debido al rozamiento, aumentando significativamente su resistencia (28). Las tiras van unidas en su extremo a un muro de revestimiento, que sirve principalmente para prevenir el escape del relleno y que está constituido por diversas placas, pudiendo emplearse también malla metálica o geotextil como material de refuerzo (29). Este método de estabilización mecánica permite crear muros mediante sucesivas capas de material compactado procedente del terreno, y la inclusión de refuerzos de forma periódica entre dichos estratos. Para un conocimiento más detallado de la misma, se recomienda consultar el Anexo D.1 del presente TFG.

1.6.1.2. Prefabricados realizados en materiales compuestos como material de armado de muros

Como evolución de la técnica existente para construcción de muros armados, se pueden diseñar medios de sujeción de tierras fabricados en materiales compuestos, que permitan realizar estas construcciones con las mismas o superiores prestaciones, y tengan un peso menor. Se plantea como material de sustitución del acero un polímero reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbono. Debido a su menor coste y similares propiedades, se ha optado por la fibra de vidrio. No obstante, puede estudiarse el empleo futuro de otros materiales.

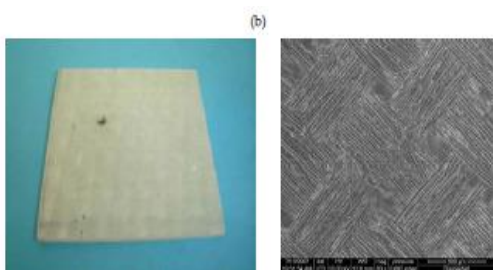


Figura 7: Placas de material compuesto. Fuente: Jara Mori, G. (2008). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras.

La aplicación propuesta consiste en el empleo de un sistema tradicional de estabilización mecánica, fabricado en materiales innovadores. El prototipo descrito se ha fabricado y probado en el Centro Tecnológico de I+D+I de Acciona, construido en terrenos propiedad de la misma (30). En esta técnica intervienen dos categorías de elementos prefabricados diferenciados: elementos de refuerzo (flejes) y elementos de revestimiento (placas).

Dada la preferencia por la fibra de vidrio expresada con anterioridad, se propone emplear como placas estructuras tipo sándwich mediante núcleos de poliuretano, formando placas

laminares de fibra de vidrio y resina de poliéster sobre tela. Se emplea fibra de vidrio FV 0/90 con un gramaje de 500 g/m^2 , y resina de poliéster; y la posterior superposición de dichas telas hasta alcanzar una placa laminar del espesor deseado. Cuentan con un núcleo de poliuretano con una densidad de 40 y 70 kg/m^3 . Se debe controlar la rugosidad superficial de las placas, siguiendo la regla planteada por Frost y Han (1999) que relaciona de forma inversamente proporcional el tamaño medio de las partículas del suelo con la rugosidad de la placa para un óptimo coeficiente de rozamiento. (27)

Como tirantes de refuerzo se han fabricado unos flejes de configuración laminar, formados por un compuesto de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio unidireccional¹⁰ (FVUD) con un gramaje de 600 g/m^2 . El diseño de los flejes, coincidentes con la orientación longitudinal de las fibras, responde a la optimización de la resistencia a tracción, dado que la carga en el plano paralelo a las fibras es absorbida por las mismas. Sin embargo, se advierte que la conexión con las placas, donde el esfuerzo es máximo, debe reforzarse para evitar su desgaste.

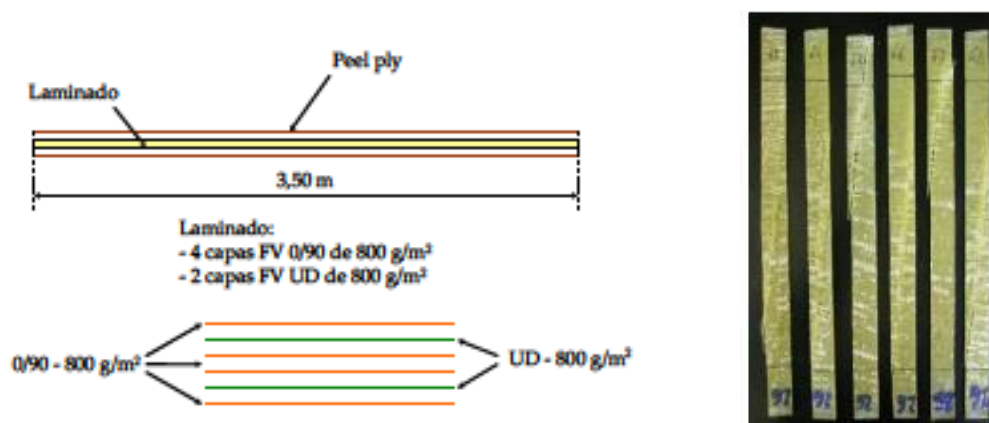


Figura 8: Flejes de material compuesto. Fuente: Jara Mori, G. (2008). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras. Universidad Politécnica de Madrid.

Finalmente, se propone como elementos conectores entre las placas y los flejes piezas en forma de L, fabricadas empleando fibras de vidrio con una configuración de $0/90$ ¹¹.

Tras la construcción del prototipo, una de las primeras impresiones ha sido la facilidad de manejo de las placas, debido a su bajo peso, no siendo necesario el uso de maquinaria elevadora, como ocurriría en caso de emplearse hormigón o acero. Además, debido a esta reducida masa, no existe límite de altura en el apilamiento vertical de las placas.

¹⁰ En los tejidos FVUD las fibras son todas paralelas entre sí, diferenciándose así de los tejidos multiaxiales (e.g. FV 0/90)

¹¹ Cuando se habla de tejido de fibra de vidrio, se designa como 0/X la orientación de una capa de fibras sobre la otra, siendo X un valor que representa el ángulo formado entre las fibras de las capas. En caso de ser fibra cuatriaxial (cuatro capas superpuestas) la configuración más habitual es de $0/90/+45/-45$, siendo las capas perpendiculares dos a dos.



El principal inconveniente del empleo de materiales compuestos es su elevado precio. El Anexo D desarrolla en profundidad el proceso de fabricación de los medios necesarios para construir un muro mediante la técnica de Tierra Armada, empleando tanto los medios tradicionales como materiales compuestos. Además, incluye una comparativa de precios de materiales compuestos.

Figura 9: Transporte manual de placas. Fuente: Castro, A. Á., Rojas, F. B., Granda, J. L., Muñoz, B. O., & Cisneros, D. G. (2006). Muro de Tierra Armada Mecánicamente Estabilizado Realizado en Material Compuesto. España.

1.6.1.3. Método de cálculo simplificado para muros mecánicamente estabilizados

Para el correcto dimensionamiento de los elementos de refuerzo es necesario un cálculo complejo, así como un análisis geotécnico y de composición del suelo, que no es práctico para ser realizado por una Unidad de Zapadores. Por ese motivo, este TFG expone un método de cálculo simplificado, cuya base teórica se fundamenta en el cálculo de la presión lateral ejercida por el terreno a partir de la presión vertical, fruto del peso del propio material y de las estructuras que soporta. A partir de ese dato, y conociendo el coeficiente de rozamiento entre la superficie de los refuerzos y el terreno, se calcula una estimación de la tracción soportada por los elementos de refuerzo. Su principal ventaja radica en la posibilidad de aplicar este método de cálculo sin necesidad de disponer de un laboratorio de suelos.

Para emplear este método, se establecen las siguientes hipótesis sobre composición del terreno: suelo homogéneo, empuje lateral normal al muro, pared lisa y perfectamente vertical y coronamiento horizontal (Rankine, 1857). Además, se supone un suelo de carácter granular, se desprecia la influencia de la cohesión del terreno¹², y se supone un nivel freático por debajo del límite inferior del muro. El método propuesto precisa de los siguientes datos como entradas. Nótese que dichos datos pueden ser estimados o medidos de forma sencilla y sin material analítico complejo.

Características de las bandas de refuerzo	Límite de fluencia
	Ángulo de los flejes
Características de las placas de revestimiento	Superficie
	Número de anclajes de flejes por placa
Características del terreno	Densidad media
Características de elementos fijos soportados por el terreno	Masa estimada
	Superficie estimada

Tabla 6: Datos necesarios para aplicar el método. Fuente: elaboración propia

¹² El valor del empuje activo, en un caso general, disminuye si se toma en cuenta la cohesión del terreno. Por tanto, al despreciarse la misma, se tiende a incrementar su valor, lo cual redundaría en un dimensionamiento de mayores elementos de refuerzo, y mayor seguridad.

Las fuerzas que actúan sobre el terreno se dividen en dos categorías:

- A. Empuje vertical: se considera en esta categoría el peso propio, entendido como suma de los pesos del terreno, estructuras fijas depositadas, u otras cargas permanentes (pavimentos, nieves perpetuas, etc.). En caso de existir sobre el mismo un tráfico frecuente de vehículos, deberá añadirse a efectos de cálculo una carga distribuida, equiparando dicha circulación de vehículos a una sollicitación permanente.
- B. Empuje del terreno: fuerza horizontal que ejerce el terreno por causa de la gravedad. Se determina a partir de la presión vertical, más sencilla de calcular.

El presente método determina el empuje lateral del terreno a partir de una simplificación de las ecuaciones de Rankine (1857). Se usa un coeficiente de presión lateral, K, que es la relación entre la presión lateral respecto a la presión vertical ($K = \sigma_h'/\sigma_v'$). Dicho coeficiente puede calcularse para cada obra, aunque se encuentran tabulados en la Tabla 9.2 de la Norma Básica de la Edificación de 1988 (actualmente derogada).¹³

Se distingue entre la presión activa, pasiva y en reposo. Llamaremos coeficiente de presión activa al empleado cuando el talud tiene a desplazarse hacia el lado opuesto al terreno, es decir, hacia donde existe libertad de movimiento. Es decir, si el terreno tiene una tendencia natural a desplomarse sobre el muro, se considera presión activa. En cambio, en caso de que la cota natural del terreno contenido por el muro sea inferior a la de la parte superior del propio muro de contención, es decir, en caso de que la tendencia sea a traccionar el paramento del muro hacia su interior, se denomina presión pasiva. En un caso límite de presión pasiva, la masa de suelo está sometida a una fuerza externa que lleva al suelo a la tensión límite de confinamiento. Como terreno sometido a presión en reposo se considerará solo aquél que sea extremadamente rígido.

Coeficiente de presión activa: $K_A = \tan^2 \left(45 - \frac{f}{2} \right)$ [Simplificación de Rankine (1857)]

Coeficiente de presión pasiva: $K_P = \tan^2 \left(45 + \frac{f}{2} \right)$

Coeficiente de presión en reposo: $K_0 = 1 - \text{sen } f$ [Fórmula de Jaky (1948)]¹⁴

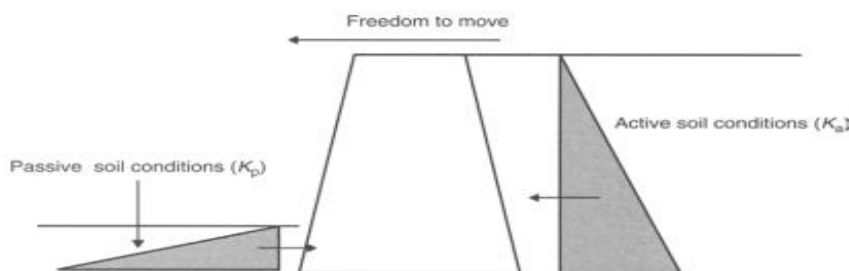


Figura 10: Presión activa y presión pasiva. Fuente: www.enriquemontalar.com

¹³ El actual Código Técnico de la Edificación no recoge coeficientes tabulados, sino que plantea exclusivamente fórmulas para su cálculo.

¹⁴ Se presupone un suelo de carácter granular. En caso de encontrarse un suelo cohesivo, se empleará la fórmula de Terzaghi (1943).

Se ha designado como f el ángulo de rozamiento interno. (31) Para determinar el ángulo de rozamiento interno sin necesidad de llevar a cabo pruebas de laboratorio ver la Tabla 8. (32)

TIPO DE SUELO	χ (grados)	TIPO DE SUELO	χ (grados)
Bloques y bolos sueltos	35-40°	Limo blando	22.5°
Grava	37.5°	Marga arenosa rígida	30°
Grava arenosa	35°	Arcilla arenosa firme	25°
Arena compacta	32.5-35°	Arcilla media	20°
Arena semicompacta	30-32.5°	Arcilla blanda	17.5
Arena suelta	27.5-30°	Fango blando arcilloso	15°
Limo firme	27.5°	Suelos orgánicos (turba)	10-15°

Tabla 7: Ángulo de rozamiento interno. Fuente: NBE AE-88 Acciones en la Edificación (derogado)

Una vez hallado el coeficiente de presión apropiado para el muro a considerar, se hallará la presión activa, para lo cual se empleará la siguiente simplificación de las fórmulas de Rankine (1857).

$$P_A = 0,5 * K_A * \mu * H^2$$

Donde se denomina μ al peso del terreno contenido por unidad de volumen, llamado peso específico, y H designa la altura total del muro diseñado.

En caso de existir cargas permanentes sobre el terreno por elementos fijos (como pavimentos, adoquinado, asfaltado, etc.) o tráfico habitual, se realiza un nuevo cálculo de presión lateral debida a cargas permanentes (P_{CP}). Para dicho cálculo, se toma la carga permanente como una carga uniformemente distribuida sobre la superficie total del muro, estimando la masa del elemento considerado. Se considera μ_{CP} como el valor de dicha carga distribuida repartida entre el volumen total de terreno contenido por el muro. Es decir, para un pavimento de densidad D (kg/m^3) y espesor E (m) repartido por toda la superficie de un muro, denominada S (m^2), se obtiene una masa total de pavimento (Mt) de Mt (kg/m^2)= $D * E$. Suponiendo que dicha carga se reparte por todo el volumen de terreno contenido, se considera una columna de área $A=1 \text{ m}^2$, y profundidad igual a la altura del muro. Por tanto, la masa de pavimento que dicha columna soporta es de $Mt * A$ (kg), que, repartida entre el volumen total de terreno de esa columna y multiplicada por la aceleración de la gravedad en la Tierra, da como resultado el valor de μ_{CP} (N/m^3).

Una vez finalizado este cálculo, se obtiene el valor de la presión lateral ejercida por el terreno sobre el muro. Este dato hace posible el dimensionamiento adecuado de los flejes de refuerzo empleados en función del rozamiento con el terreno.

Para calcular el empuje unitario a distintas profundidades del suelo, se emplea el mismo supuesto que estableció Coulomb (1776) de que todo punto del paramento interno constituye el pie de una superficie de deslizamiento potencial (33). Por ese motivo, se tiene que el empuje unitario P_{A1} a una profundidad H_1 se calcula como:

$$P_{A1} = \frac{dP}{dH_1}$$

Finalmente, pueden calcularse las solicitaciones que actúan sobre los refuerzos. Para esta operación, debe conocerse el coeficiente de rozamiento estático existente entre los flejes empleados y el terreno. Dado que dicho coeficiente se determina mediante material de laboratorio, del cual no disponen las Unidades, este Trabajo de Fin de Grado (TFG) propone la realización futura de un ensayo con diferentes materiales y terrenos, con objeto de tabular este coeficiente entre diversos materiales y terrenos.

Por otro lado, debe considerarse la tracción ejercida por las placas sobre los flejes. Para ello, y conocida la superficie de las placas de revestimiento, se hallará la fuerza que dicho empuje lateral produce sobre cada placa, y se supondrá que ésta genera una reacción de igual módulo y contrario sentido sobre los flejes unidos a la placa.

Otra cuestión a tener en cuenta es que en este método se consideran flejes colocados perfectamente paralelos a la dirección de las solicitaciones laterales. En caso de existir una desviación clara, debe recalcularse la componente soportada por los refuerzos en función del ángulo de los mismos respecto de dicha posición perfecta.

Como puede observarse, este método de cálculo solo considera como modo de fallo la inestabilidad interna del muro. De forma tradicional, o mediante el empleo de *software* especializado (e.g. SLOPE®), se calcula la estabilidad global, y se dimensionan los flejes necesarios. Dado que para aplicar esta técnica se tendría de antemano unos flejes predimensionados en dotación, y no se fabricarían de forma específica para cada obra, este método primero calcula las solicitaciones, para después verificar la resistencia de los flejes disponibles. Se desprecian cuatro modos de fallo: estabilidad global, vuelco, deslizamiento y hundimiento, que deben considerarse en caso de quererse llevar a cabo un cálculo exhaustivo del muro.

Como resulta evidente, este método de cálculo, de carácter expedito, es sumamente aproximado y por tanto sus resultados son poco precisos. Sin embargo, es de utilidad a la hora de realizar dimensionamientos rápidos de apuntalamientos, con escaso o nulo material de análisis de suelos. Por otro lado, debido al carácter temporal de las obras de fortificación de Zapadores, se puede emplear como método para el diseño de muros de Tierra Armada, aplicando un coeficiente de seguridad a determinar para cada obra. Otra cuestión distinta a la fortificación de campaña es la utilización de la técnica de Tierra Armada en bases militares permanentes o polvorines. Su construcción se realiza con características constructivas propias de las estructuras duraderas, y al estar situados generalmente en Territorio Nacional, deben acogerse a la normativa en vigor.

1.6.2. Aditivos para refuerzo de tierras en ambiente desértico

Gran parte de las misiones actuales de las FAS tienen lugar en ambientes desérticos, donde es característico un terreno compuesto por material arenoso suelto, que es fácilmente desplazado por el viento. La construcción de fortificaciones en el desierto se complica enormemente por el tipo de suelos y la naturaleza abrasiva de la arena y el polvo. El desierto afecta de forma nociva a la maquinaria y a los materiales constructivos. El planeamiento de Ingenieros ha de tener en cuenta una baja en el rendimiento de los medios en torno a un 20 - 25% (34) en este entorno. A este hecho hay que añadir la dificultad para la ocultación de movimientos de maquinaria y equipo en desiertos llanos. Ante este paradigma, algunos de los

principales ejércitos emplean sustancias fijantes pulverizadas sobre el sustrato arenoso, que unen entre sí las partículas que componen el mismo y dan coherencia a los suelos sueltos.

En este trabajo se han estudiado algunos compuestos, ya utilizados (Nerosine y Coherex). Por ejemplo, se ha considerado el Nerosine, un producto empleado por el ejército ruso. El Nerosine es un hidrocarburo policíclico aromático que contiene básicamente un anillo de antraceno unido a un anillo de naftaleno. Se obtiene mediante fracción del petróleo de esquisto cuya alta polaridad permite una óptima adhesión a la arena y a otros compuestos minerales. De esta forma, permite dar estabilidad al sustrato, fijándolo, al tiempo que garantiza la permanencia de su compactación y, de esta forma, se evita la proyección de arena y polvo. Estas sustancias deben ser manejadas con precaución, ya que son descritas como potencialmente cancerígenas. Asimismo, para su empleo es necesario el uso de guantes, gafas y traje de protección para el cuerpo y la cara (35).

Por este motivo, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías, cuya principal ventaja es un menor carácter contaminante y nocivo para el entorno. Se ha ensayado la estabilización de la arena en el desierto con nuevas sustancias del grupo de los polímeros elásticos. En Rusia y otros países se han empleado los compuestos de la familia del butadieno-estireno látex. Las propiedades mecánicas de estos compuestos son muy interesantes para la estabilización del terreno desértico, y por ello también están siendo objeto de amplia investigación en el ámbito civil para la fijación de las dunas (36). Diferentes estudios y experiencias civiles con otras sustancias pueden ser también de interés militar, como las realizadas con la urea-formaldehído (o urea metanal), urea dicianidamida y la poliacrilamida (37).

1.7. Protección de superficies de contenedores mediante polímeros

Como se ha mencionado anteriormente, los contenedores de vida son empleados con frecuencia en asentamientos en ZO. A menudo dichos asentamientos son atacados mediante fuego de fusilería, morteros o cohetes. Los contenedores en dotación en el Ejército de Tierra no cuentan con protección balística y son vulnerables ante estas acciones hostiles. Debido a este hecho, el presente trabajo propone el empleo de tratamientos de refuerzo para aumentar la resistencia de los contenedores de vida, así como de cualquier otra superficie potencialmente expuesta a ataques de este cariz.

Tras el análisis de documentos relativos al blindaje y protección de superficies y vehículos

militares (18), se propone un recubrimiento de la superficie mediante poliurea. Este material mixto tiene dos componentes, que reaccionan sobre la superficie de aplicación: un isocianato y una poliamina, además de aditivos, como pigmentos, estabilizadores ante UV o agentes antimicrobianos¹⁵. Existen dos tipos de poliurea:



Figura 11: Composición de la poliurea.
Fuente: www.tecnopol.es

¹⁵ La principal diferencia entre los dos reactivos y los aditivos mencionados es que los últimos se mezclan con un carácter físico, modificando las propiedades del compuesto, pero no la fórmula de la poliurea.

alifática o aromática. La poliurea aromática es más tenaz y tiene baja resistencia a los rayos UV, produciéndose su decoloración. No obstante, su precio es menor.

El empleo de poliurea como refuerzo de blindajes ha sido probado en diversas ocasiones. Su principal ventaja es la reducción de la proyección de fragmentos metálicos hacia el interior del habitáculo como consecuencia de la detonación, tal y como sucede con el hormigón. Como ejemplo de aplicación de esta tecnología, la empresa Specialty Products Inc. (SPI) comercializa un producto a base de poliurea bajo el nombre *Dragonshield BC*. Este compuesto cumple con la normativa estadounidense para sistemas de protección en instalaciones militares UFC¹⁶ (*Unified Facilities Criteria*) (38) (39) y pueden consultarse de forma pública referencias a diversas demostraciones de sus capacidades de protección.

Por otro lado, este tratamiento aumenta la resistencia de la superficie también frente a munición convencional. La empresa Indeo Engineering ha llevado a cabo ensayos (40) sometiendo bloques de hormigón prefabricado y placas de acero a disparos de munición Winchester .308 (7,62x54 mm). Su excelente resistencia a tracción posibilita que se reduzca o evite la disgregación de los elementos prefabricados, evitando el colapso de estructuras de



bloques o ladrillos, y reduciéndose la proyección de fragmentos. Por otro lado, las perforaciones causadas por munición de pequeño calibre tienden a autosellarse. El Anexo E recoge con más detalle los datos técnicos sobre la poliurea seleccionada.

Figura 12: Comparación de daños sobre metales. Fuente: Indeo Engineering

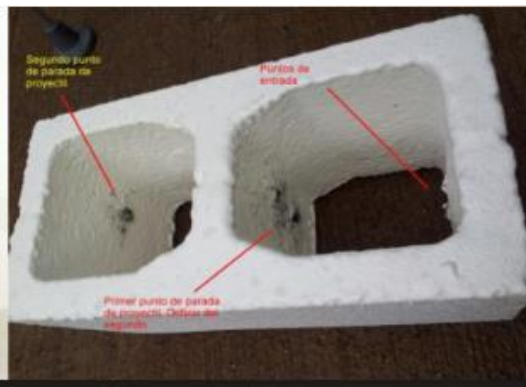


Figura 13: Comparación de impacto en bloque sin/con poliurea. Fuente: Indeo Engineering

Como ventaja adicional, las superficies tratadas con poliurea pueden repararse sobre el terreno mediante el mismo método empleado en su aplicación inicial. Esta prestación es fundamental para elementos proyectados a ZO, donde la evacuación de medios para su reparación requiere un ingente esfuerzo logístico.

¹⁶ Sistema United Facilities Criteria (UFC), establece criterios para el diseño, construcción, mantenimiento y mejora de las instalaciones militares de los EEUU

1.8. Implementos para las máquinas en dotación destinados al manejo de elementos prefabricados pesados

Las Compañías de Zapadores no disponen en dotación de maquinaria destinada de forma específica al manejo y desplazamiento de elementos prefabricados pesados. Sin embargo, para las tareas de fortificación es común el empleo de otro tipo de maquinaria, como retroexcavadoras, minicargadoras o carretillas elevadoras. Estas máquinas, si bien no están destinadas a este fin específico, pueden ser dotadas de implementos que permitan manejar elementos pesados y frágiles con eficacia.

Una de las máquinas de empleo más habitual en obras de fortificación es la retrocargadora modelo JCB 3CX-4T/K. Esta máquina cuenta con una pala frontal destinada al movimiento de grandes masas de tierra suelta en superficie, y un brazo trasero con movimiento tridimensional, que puede acoplar diferentes implementos. Los implementos para el brazo articulado de uso más común en las Unidades de Zapadores son: la “cuchara” o cazo, cuya función es la excavación o el movimiento de masas de tierra y el martillo quebrantador, que permite fracturar objetos sólidos mediante la aplicación repetida de presión puntual sobre el mismo a través de un “punzón” o punta metálica. Es de destacar que la pala frontal dispone de dos “uñas”, un implemento metálico que permite emplearla como si de una carretilla elevadora se tratase. Si bien permite mover objetos en altura, y desplazarlos mediante el movimiento de la propia máquina, sus posibilidades son limitadas y aporta poca versatilidad.

La retroexcavadora es empleada habitualmente para desplazar objetos. Durante la realización de este estudio se ha podido asistir al transporte de diversos elementos prefabricados de hormigón armado empleando los implementos disponibles (cazo y pala frontal). Se ha llevado a cabo un ensayo de manipulación de cargas mediante el brazo articulado, en el que se ha observado que, aunque se logra cumplir el objetivo, se hallan múltiples dificultades a la hora de realizar estas tareas, y el elemento manejado acaba por deteriorarse (ver Anexo F).

Se propone la adquisición de implementos específicos, disponibles en el mercado, destinados al manejo de estos elementos. La casa JCB dispone de varios implementos, clasificados dentro de la categoría “equipos de elevación”. Entre ellos, destaca el implemento de gancho grúa, acoplable al brazo articulado. Permite el desplazamiento vertical de cargas en suspensión de hasta 1000 kg de masa mediante un cable de acero. Además, existe un implemento llamado “extensor-grúa”, que sustituye a la pala frontal, y permite el desplazamiento de cargas de hasta 300 kg. Es de señalar que la casa JCB es la que dispone de mayor número de implementos de este tipo.

El dotar a las Unidades con medios de excavación que a la vez permitan la elevación y manipulación de cargas aporta a las mismas una gran flexibilidad y mayor capacidad de proyección, eliminando la necesidad de disponer de varias máquinas y permitiendo operar con materiales prefabricados, como elementos de hormigón armado o acero, sin incurrir en el deterioro de los mismos, de la maquinaria, y reduciendo los riesgos para el personal.

1.9. Empleo de perfiles estructurales de fibra de vidrio como sustitutivo de la madera

La doctrina recoge el empleo de tablones de madera como método tradicional para elaborar cubiertas en refugios subterráneos y con fines estructurales en asentamientos enterrados. Si bien posee numerosas ventajas (trabajabilidad, coste reducido, disponibilidad en gran parte del mundo, etc.), sus inconvenientes hacen necesario estudiar opciones que permitan reemplazar la misma por otros materiales tecnológicamente más avanzados. Entre dichos inconvenientes cabe citar: escasa resistencia a la humedad, vulnerabilidad al fuego, necesidad de mantenimiento y masa elevada cuando se emplea en grandes volúmenes.

Este trabajo presenta como propuesta de sustitución los perfiles estructurales de aluminio, o los de PVC reforzado con fibra de vidrio.

El aluminio se presenta como opción de sustitución para los perfiles IPE de acero. La densidad del aluminio es de 2700 kg/m³, aproximadamente un tercio de la del acero, 7830 kg/m³. Además, las características mecánicas de sus aleaciones de alta resistencia son óptimas para su uso en fortificación. Como inconveniente, destaca su elevado coeficiente de dilatación térmica lineal, de $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, y que la soldadura del aluminio es más compleja que la del acero.

A fin de obtener criterios comparativos precisos entre las opciones mencionadas, se ha llevado a cabo una simulación mediante el software TwoDFrame[®] de simulación estructural en dos dimensiones, en el cual se ha diseñado la estructura necesaria para construir un refugio enterrado de 90 m³ en tres casos diferentes:

1. Caso 1: estructura y cubierta en vigas de madera de sección cuadrada de 0,2 m.
2. Caso 2: estructura portante en perfiles IPE 200 de acero S235 con cubierta de madera, de los perfiles cuadrados anteriores.
3. Caso 3: estructura de perfiles IPE 200 en aluminio AlMgSiO con cubierta de madera

Para conocer las solicitaciones que actúan sobre la estructura, se ha supuesto una capa de tierra seca no compactada cubriendo el refugio, y se ha modelado la misma como una carga uniformemente distribuida, de valor 7595 N/m². Para este análisis se ha tomado un solo pórtico en cada caso, compuestos por dos pilares y un dintel.

Se ha calculado la masa total de cada uno de los tres pórticos analizados, así como la distribución de esfuerzos y la deformación de la estructura. Para evaluar la deformación, se ha medido el desplazamiento lineal del punto medio de cada uno de los perfiles. Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 8.

	Desp. pilar	Desp. dintel		Desp. pilar	Desp. dintel
Caso 1	0,01 mm	0,85 mm	Caso 2	0 mm	0,74 mm
Caso 3	0,03 mm	1,12 mm	Caso 3	0,03 mm	1,12 mm
Relación	300%	131%	Relación	-	151%
Δ Masa	80,1 kg		Δ Masa	56,54 kg	

Tabla 8: Comparativa entre perfiles. Fuente: elaboración propia

Los resultados concluyen que, si bien la deformación del tercer pórtico es superior a la de los dos casos anteriores, la reducción de masa respecto de la tradicional opción de empleo de madera es sustancial (dada una masa del pórtico de madera de 224 kg, se logra una reducción del 36% en la masa total). El proceso completo de preparación de la simulación, así como los resultados obtenidos y el análisis de los mismos se desarrolla en el Anexo G del presente TFG.

En el caso del PVC reforzado con FV, se han analizado los productos de varias casas comerciales (Strongwell, Siesa, Fibergate y Tecnipul). Finalmente, se ha seleccionado como fuente de datos para este estudio la marca Dynaform de la empresa Fibergrate, pues ofrece perfiles estructurales pultruidos en diversas formas y tamaños.

Una de las ventajas de la adquisición de perfiles estructurales de plástico reforzado con fibra de vidrio comerciales frente al empleo de tableros de madera cortados en obra radica en la estandarización de los mismos. Todos los perfiles analizados han sido evaluados para determinar sus propiedades físicas conforme a procedimientos estandarizados de la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM). Dado que dichos perfiles son sometidos a ensayo y se conocen con precisión sus propiedades y características, los cálculos de dimensionamiento de las estructuras son más sencillos que con madera. Ambas opciones de perfiles propuestos se detallan en mayor profundidad en el Anexo G.

Conclusiones

Este estudio surge debido a la creciente necesidad de disponer de fortificaciones más rápidas de construir, con materiales fáciles de transportar a grandes distancias y con un alto grado de protección frente a las nuevas amenazas en ZO, en especial los ataques con explosivos desde el perímetro de la base. Además, debido al carácter cambiante de las recientes misiones de las FAS, se hace necesario actualizar los medios de fortificación, diseñados para responder a las necesidades de los anteriores escenarios de actuación, y orientados al combate convencional.

Por este motivo, se ha realizado un análisis mediante la consulta de las publicaciones más recientes y la asesoría del personal militar que ha participado en las últimas misiones, el cual ha servido para definir requisitos con los que orientar la prospectiva tecnológica, objeto de este TFG. Las tecnologías, técnicas y productos seleccionados, además de cumplir estos requisitos, aumentan el grado de protección de la Fuerza y hacen más sencillo y rápido el trabajo de fortificación.

La principal mejora expuesta pasa por aumentar la resistencia de las barreras de hormigón frente a detonaciones, mediante el empleo combinado de revestimientos anti-fragmentación con láminas de polímero reforzado, junto con las formulaciones de hormigón de altas prestaciones. Por otro lado, se ha detectado que no existe una tecnología moderna de estabilización del terreno, ante lo cual se propone implementar un sistema mecánico mediante materiales ligeros fabricados con *composites*. Finalmente, se propone emplear productos existentes en el mercado, de uso civil, en el ámbito de la fortificación. Entre ellos, destaca la

poliurea como tratamiento para mejorar la protección de superficies frente a impactos de bala o metralla, así como la adquisición de implementos tipo grúa para la retroexcavadora en dotación, o la sustitución de los tablones de madera por perfiles estructurales ligeros, de aluminio o PVC reforzado.

Líneas futuras de trabajo

Durante la realización del presente TFG, se ha llevado a cabo una prospectiva tecnológica enfocada en los principales centros de investigación extranjeros, así como en centros españoles, como el Instituto Tecnológico La Marañosa, o en diversas Universidades de todo el mundo. Fruto de todo ello, se han seleccionado las tecnologías expuestas en la Memoria. No obstante, diversas tecnologías y productos analizados durante la realización de este proyecto no figuran en la misma, por no cumplir con los requisitos definidos, o por considerarse inferiores en sus prestaciones a las seleccionadas.

Se propone mantener una vigilancia tecnológica sobre las fuentes empleadas para este estudio, así como llevar a cabo periódicamente análisis como el reflejado en esta Memoria, a fin de mantener los medios de fortificación en un estado lo más actualizado posible. En el Anexo H se nombran tanto centros de investigación como tecnologías concretas, que sirven de punto de partida para futuras prospectivas.

Asimismo, tal y como se menciona en la propuesta del presente TFG, es necesario llevar a cabo un estudio económico para garantizar la aplicabilidad de las tecnologías y medios descritos. En último término, una vez localizados los materiales o las soluciones más adecuadas técnicamente, será necesario un estudio económico para tener la justificación completa de la inversión.

Bibliografía

1. *Nato Standardization Office. (2015). Allied Joint Doctrine for Force Protection. In AJP-3.14 (A Version). Retrieved from https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/454616/20150804-AJP_3_14_Force_Protection_Secured.pdf.*
2. *NATO Standardization Agency. (2003). AAP-19 NATO Combat Engineer Glossary.*
3. *Robles Sáenz, J. I. (2015). Informe T 22-15 para la construcción de una COP. Ceuta: RING 7.*
4. *Deal, B. (2013). Dimensiones barrera "Alaska" (No. FA5702-13-T-0009).*
5. *Giblin, K. (2006). The Jersey barrier. Invention and Technology Magazine, 1–6.*
6. *Robles Sáenz, J. I. (2015). Informe T 22-15 ANEXO A. Ceuta: RING 7.*
7. *Zarco Moreno, M. (2010). Pliego De Prescripciones Técnicas para la Adquisición de 100 Gaviones Modulares (Vol. 53). Guadalajara. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.*
8. *Hesco. (2013). Defensive Barriers Technical Specification Sheet MIL 1 5442 Unit Defen. Charleston. Retrieved from <https://www.hesco.com/media/1523/technical-information-mil.pdf>.*
9. *Defencell. (n.d.). Catálogo de Defencell DT1. Retrieved from http://www.militarysystems-tech.com/files/militarysystems/supplier_docs/DefenCell_DT1_Walls.pdf.*
10. *ARPA E.M.C. (1999). Manual de instrucciones del contenedor dormitorio ARPA.*
11. *Delgado de Felipe, J. (2000). PPT Dormitorio sobre contendor desmontable de 20 pies (No. PCAMI/CP/PT062A/00). Madrid.*
12. *Department of Defense Design Criteria Standard (2012). EEUU. Retrieved from www.everyspec.com.*
13. *NATO Standardization Agency. Fire Fighting Equipment And Principles For Harmonization Of Present And Future Equipment And Materials (2016).*
14. *Ekström, J., Rempling, R., & Plos, M. (2016). Spalling in concrete subjected to shock wave blast. Engineering Structures, 122, 72–82.*
15. *Reglamento de artículos pirotécnicos y cartuchería-IT 9: Instalaciones de almacenaje (2010). España: BOE 113.*
16. *Review of Concrete Structures Strengthened with FRP Against Impact Loading. Pham, Thong. s.l. : Elsevier, 2016, Vol. 7.*
17. *Techniques and Procedures for the Measurement of Impulse Noise. Brinkmann, Heinz. ADPO10340, Meppen : s.n.*
18. *De la Red Bellvis, E. J. (n.d.). Seguridad estructural. In Nuevas formulaciones para blindajes balísticos (pp. 26–55). Inndeo Engineering.*
19. *Aitchin, P. (2000). Cements of yesterday and today, concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, 30. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00365-3).*

20. Allauca Pincay, L., Amen Loor, H., & Lung Álvarez, J. (2009). *Uso de sílice en hormigones de alto desempeño*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
21. Olivares, Francisco Hernández. *Materiales de Última Generación y Materiales Eficientes*. [En línea] https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42351/SESSION%20%20Hormigones%20avanzados%200708.pdf.
22. Wang, D.-R. (2006). *Investigation of calculation method for anti-penetration of reactive power steel fiber concrete(RPC)*. China Knowledge Integrated Database. PLA University of Science and Technology of Nanjing, Beijing.
23. ASTM International. *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. 2006. C-305.
24. Santa Maria Oyanedel, H. (2011). *Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP*. *Construction and Building Materials*, 25, 1172–1180.
25. Orton, S. L., Jirsa, J. O., & Bayrak, O. (2008). *Design Considerations of Carbon Fiber Anchors*. *Journal of Composites for Construction*, 12(6), 608–616. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:6\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:6(608)).
26. Orton, S., Kirby, J., Wheeler, M., & Brune, M. (2011). *Use of Carbon Fiber Anchors to Improve Performance of CFRP Strengthened Concrete Structures Subjected to Blast and Impact Loads*. *International Concrete*, 281, 1–20.
27. Dena Arto, Á. (2014). *II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014*. Ed. Centro Universitario de la Defensa, (*Ensayo de soluciones constructivas para mejorar la seguridad de muros de fábrica frente a explosiones*), 183–191. Retrieved fro.
28. Jara Mori, G. (2008). *Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras*. Universidad Politécnica de Madrid.
29. Hernández Mendoza, O. Y. (2014). *Procedimiento constructivo de muros de contención con tierra armada*. Universidad Veracruzana.
30. Castro, A. Á., Rojas, F. B., Granda, J. L., Muñoz, B. O., & Cisneros, D. G. (2006). *Muro de Tierra Armada Mecánicamente Estabilizado Realizado en Material Compuesto*. España.
31. Rajapakse, R. A. (2008). *Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb*.
32. Blázquez, L. B., & Beviá García, J. (2000). *Manual de Carreteras*. Alicante. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10045/1787>.
33. Terzaghi, K., & Perk, R. (1976). *Teoría de Rankine del Empuje de Tierras*. In *Mecánica de los Suelos en la Ingeniería Práctica* (pp. 191–213).
34. Grau, L. (1995). *Desert Defense and Surviving PGMs : the New Russian View*. Red Thrust Star, Pág. 5.
35. TRICOR Refining LLC. *Coherex® Safety Documentation*. Bakershield (California). : s.n.
36. Shehata, W. M., & Al-Rehaili, M. H. (2003). *A Review on Sand Dune Stabilization*. Saudi Geological Survey.

37. Mohsin, M. A., & Attia, N. F. (2015). *Inverse Emulsion Polymerization for the Synthesis of High Molecular Weight Polyacrylamide and Its Application as Sand Stabilizer*. *International Journal of Polymer Science*. University of Sharjah. <https://doi.org/http/>.
38. Department of Defense. (2006). *MIL-STD-3007F: Standard Practice for Unified Facilities Criteria and UFC Guide Specifications*. United States of America.
39. Department of Defense. *UFC DoD Security Engineering Facilities Planning Manual (2008)*.
40. De la Red Bellvis, E. J. (n.d.). *Seguridad estructural*. In *Nuevas formulaciones para blindajes balísticos* (pp. 26–55). Inndeo Engineering.
41. [En línea] www.terre-armee.com.
42. Piqueras, Víctor Yepes. [En línea] victoryepes.blogs.upv.es.
43. Urbanismo, M. de O. P. y. (1989). *Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado*.
44. Jara Mori,, Gonzalo y Fort López-Tello, Luis. *Evaluación de la Fricción Superficial entre Suelos y Materiales Compuestos*. 2009.
45. Botello Rojas, Javier, y otros. *Muro de tierra armada mecánicamente estabilizado realizado en material compuesto*. E11382366 España, 8 de Enero de 2014.
46. Specialty Products Inc. (2007). *Ficha técnica de la Poliurea Dragonsshield-BC*.
47. Corporativa, R. I., Manzano, Z., Fuente, A., & Humano, C. (2016). *Ficha técnica Tecnocoat P-2049*. Barcelona: Tecnopol. Retrieved from www.tecnopol.es.
48. Tecnalia. (2014). *Estudio de resistencia a la abrasión por arena de recubrimientos de poliurea (No. 40090)*.
49. Specialty Products Inc. (2007). *Ficha técnica de la Poliurea Dragonsshield-BC*.
50. Graco. (2007). *Manual de Dosificador multicomponente eléctrico calefactado (No. 313147T)*. Minneapolis. Retrieved from www.graco.com.
51. JCB. (n.d.). *Catálogo Comercial Retroexcavadora 3CX/4CX*. Retrieved from www.jcb.com.
52. JCB. (n.d.). *Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial*. Retrieved from www.jcb.com.
53. [En línea]
<http://www.catedracanciani.com.ar/cancianiweb/E2/evaluacion%202013/Tecnologia.pdf>.
54. [En línea]
http://www.euroimportadora.com.mx/SYS_user/tips_tecnicos/es/Peso_Especifico_de_Materiales.pdf.
55. Gustavo Maffia, E. (2013). *Estructura y Propiedades del Aluminio y sus aleaciones*. Buenos Aires: Universidad de la Plata.
56. Miguzzi, Gianluca. *Fiber reinforced plastics*. s.l. : Alinea, 2009. ISBN 10:8881252422.
57. Fibergate Composite Structures. (2013). *Catálogo de Perfiles Estructurales Dynaform*.

58. US Army Engineer School. *Field Fortifications*. Fort Leonard Wood (Missouri) : s.n., 2005. EN0065.
59. Boone, Nicholas. *Transportable modular configuration for holding panels* . US 8464493 Estados Unidos, 2009.
60. Durst, B., Neely, B. y O'Neil, E. *Structures and components comprising blast-resistant concrete also suitable for limiting penetration of ballistic fragments* . US 8016938 B2 Estados Unidos, 2010.
61. *5.-Ballistic Penetration Test Results for Ductal® and Ultra-High Performance Concrete Samples*. Thornhill, T y Reinhart, W. 2010.
62. Smith, J., Cusatis, G. y Pelessone, D. et al. *Discrete Modeling of Ultra-High-Performance Concrete with Application to Projectile Penetration*.
63. *Engineer Update*. 1994, Vol. 1.
64. Geocell. *RDFW Instruction Manual*. San Francisco : s.n., 2004.
65. Couser, A. *First CEB Information Paper: Rapid Deployment Fortification Wall*. 2006.
66. [En línea] <https://inforeactor.ru/36679-sovetskaya-fortifikaciya-sovremennyh-rossiiskih-vs..>
67. *Special Report Advanced Military Frontline Fortification and Barrier Solutions*. Ltd., Global Business Media. Surrey, Reino Unido : s.n., 2015.
68. Institution, British Standardization. *Catálogo BSI*.
69. [En línea] www.defence-structures.com.
70. [En línea] Octubre de 2016. www.defencell.com.
71. Orton, S., Kirby, J., Wheeler, M., & Brune, M. (2011). *Use of Carbon Fiber Anchors to Improve Performance of CFRP Strengthened Concrete Structures Subjected to Blast and Impact Loads*. *International Concrete*, 281, 1–20.
72. Zhu, H., Yin, J., Asce, M., Yeung, A. T., Asce, F., & Jin, W. (2011). *Field Pullout Testing and Performance Evaluation of GFRP Soil Nails*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (July), 633–642. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-560).
73. Han, J., & Frost, J. (1997). *Stress Dependent Friction Coefficients for Sliding Particle Interfaces*. In *9th International Conference of the Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (pp. 2055–2060).
74. Lampo, R., Nosker, T., Barno, D., Busel, J., Maher, A., Dutta, P., & Odello, R. (1998). *Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program*.
75. Urbanismo, M. de O. P. y. (1989). *Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado*.
76. Bartley Durst Billy D. Neeley, Edward F. O'Neil, Toney K. Cummins.
77. Muñoz, F. B., Fresno, D. C., & Ortega, M. G. (2000). *Definición, función y clasificación de los geotextiles*. *Arte Y Cemento, (Obra Pública)*, 122–130.
78. Zhu, H., Yin, J., Asce, M., Yeung, A. T., Asce, F., & Jin, W. (2011). *Field Pullout Testing and Performance Evaluation of GFRP Soil Nails*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (July), 633–642. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-560).

79. *Materiales de Última Generación y Materiales Eficientes*. Olivares, Francisco Hernández. s.l. : Master Oficial en Arquitectura y Ciudad de la UAH, 2006.

ANEXOS

ANEXO A. Cálculo de rendimiento en puesta en obra de un módulo MIL 1 5442 HESCO

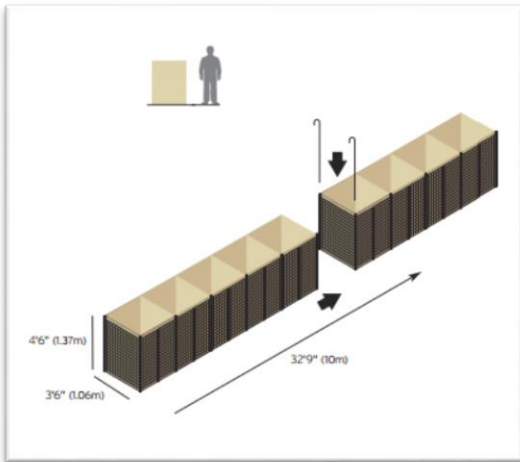


Figura 14: Gavión Hesco. Fuente:www.hesco.com

Volumen total = $13,85 \text{ m}^3$

Rendimiento por hombre en movimiento de tierra suelta = $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$

Tiempo estimado manual = $13,8/(0,4*9) = 3,84 \text{ h}$

*Se considera que, debido al método de trabajo usualmente empleado (un trabajador dentro de cada celda) solo podrán trabajar 9 hombres por módulo.

Rendimiento de retroexcavadora = $60 \text{ m}^3/\text{h}$

Tiempo estimado maquinaria = $13,8/60 = 0,23 \text{ h}$

ANEXO B. Encuesta sobre la situación actual de los medios de fortificación

B.1. Modelo de encuesta planteada al personal del BZ XII

I. Señale los medios prefabricados de fortificación con los que ha trabajado

<input type="checkbox"/>	Gaviones Hesco-Bastion
<input type="checkbox"/>	Barreras de hormigón prefabricado T-wall o tipo Bremer
<input type="checkbox"/>	Barreras de hormigón prefabricado vehiculares tipo Jersey
<input type="checkbox"/>	Otro tipo de prefabricado de hormigón (tubo, galería, etc.)
<input type="checkbox"/>	Prefabricados de madera-estructuras en madera
<input type="checkbox"/>	Gaviones Defencell
<input type="checkbox"/>	Refugio metálico Abri-shelter

- II. ¿Qué ventajas tiene cada uno de los medios señalados en el primer punto a la hora de su **instalación/montaje**?
- III. ¿Qué inconvenientes tiene cada uno de los medios señalados en el primer punto a la hora de su **instalación/montaje**?
- IV. ¿Qué ventajas o prestaciones destaca de cada uno de los medios señalados anteriormente en su **uso**, una vez instalados?
- V. ¿Qué inconvenientes o defectos tiene cada uno de los medios señalados anteriormente en su **uso**, una vez instalados?
- VI. ¿Cómo **mejoraría** los medios señalados? ¿Qué añadiría? ¿Qué reemplazaría?
- VII. ¿Qué problemas detecta a la hora de trabajar de forma **manual** con los medios señalados?
- VIII. ¿Qué problemas detecta a la hora de trabajar mediante **maquinaria** con los medios señalados?
- IX. ¿Qué problemas observa de forma habitual a la hora de realizar trabajos de fortificación?
- X. Cite cualquier otra cuestión relativa a la mejora de los materiales prefabricados en dotación que considere de interés.

B.2. Análisis de datos

La encuesta se ha planteado a un total de 10 miembros del BZ XII. Los resultados de la primera pregunta revelan que trabajan o han trabajado tanto con gaviones como con Abri-shelter (refugios metálicos) y madera de forma común, pero no así con prefabricados de hormigón.

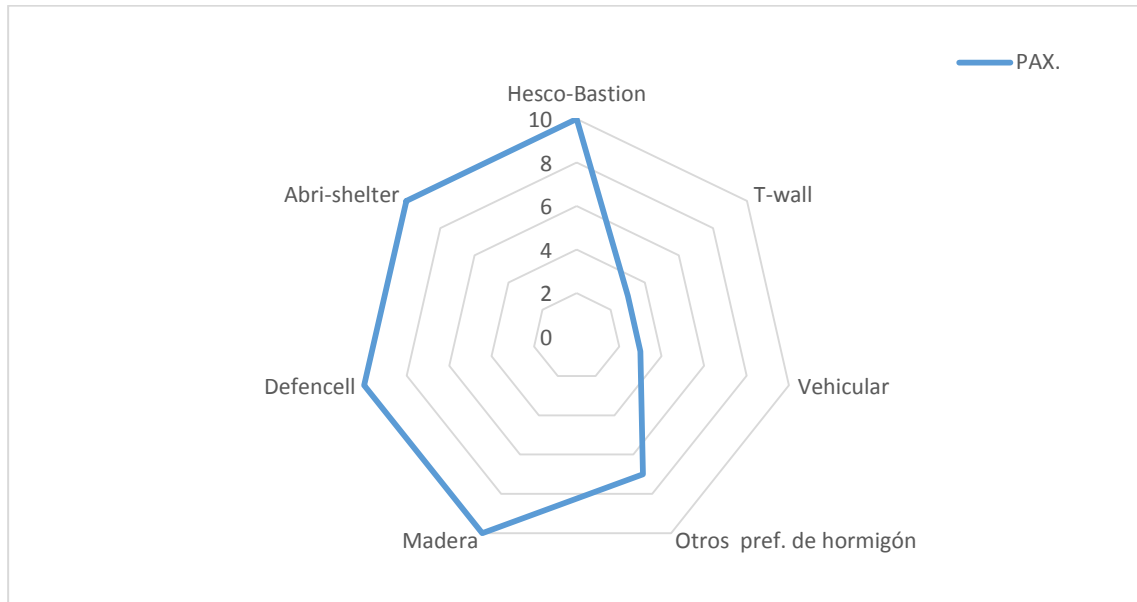


Figura 15: Análisis de datos. Fuente: elaboración propia

Se han extraído las siguientes conclusiones a través de las entrevistas y de las respuestas a las encuestas:

- I. HESCO-BASTION: destaca su rapidez y sencillez de montaje. El personal señala la necesidad casi obligada de disponer de maquinaria de movimiento de tierras para su instalación, pues sin la misma se alarga excesivamente el plazo de ejecución de los trabajos, y aumenta considerablemente el esfuerzo requerido. Del mismo modo, destacan el hecho de que es necesario disponer de cierta experiencia y conocimiento para su correcta instalación, puesto que un llenado deficiente repercute de forma negativa en su durabilidad.
- II. BARRERAS DE HORMIGÓN TIPO BREMER Y TIPO JERSEY: los encuestados señalan su amplio uso en ZO, si bien no se extrae ninguna conclusión destacable.
- III. OTROS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN: se señala como aspecto negativo su fragilidad y la tendencia a fracturarse en su manejo. Los encuestados citan como ejemplo los tubos empleados como elementos de drenaje en diversos trabajos llevados a cabo en la Base Militar "El Goloso", que han sido manejados mediante maquinaria no específica. Si bien el manual de la retroexcavadora contempla la posibilidad de emplear el brazo articulado como elemento de manipulación, mediante el uso de eslingas o cables, la experiencia de los trabajadores refleja que, a menudo, esto provoca desperfectos en los elementos manipulados. Por otro lado, el personal de la Unidad argumenta la escasa precisión que este tipo de técnica de manipulación ofrece. Los encuestados plantean el emplear maquinaria específica de elevación y manipulación de elementos pesados o la adquisición de sistemas de protección ante

la manipulación para los elementos mencionados (tales como almohadillas, telas acolchadas, etc).

- IV. PREFABRICADOS EN MADERA: crítica a su baja durabilidad. Los encuestados postulan que el uso de madera debe tener carácter temporal. Además, se enuncia como inconveniente su mal comportamiento en ambientes húmedos, así como la existencia de filtraciones de agua en caso de emplearse en este ambiente. Por otra parte, los encuestados presentan como inconveniente el elevado peso de la madera, que suele emplearse en formatos de gran volumen.
- V. DEFENCELL: gaviones de menor entidad y sin enrejado metálico. Los encuestados manifiestan sus ventajas en trabajos de explanación y contención de tierras frente a los Hesco-Bastion, por su menor tamaño y facilidad de llenado. Su uso es poco habitual, y es un material relativamente nuevo para las FAS, por lo cual las lecciones aprendidas de su empleo son escasas.
- VI. REFUGIO METÁLICO: los encuestados destacan como altamente ventajosa su resistencia a cargas elevadas. No se han obtenido resultados de interés.

Además, se han señalado problemas a la hora de realizar trabajos de fortificación que deben tenerse en consideración. Por ejemplo, los encuestados indican que en obras subterráneas o excavaciones, puede existir necesidad de apuntalamiento, por seguridad o como medio para reforzar la posición ante posibles ataques. No existe para tal fin material específico en dotación, y se realiza con madera, existiendo los problemas anteriormente señalados. Un 60% de los encuestados afirman haberse visto involucrados en trabajos bajo la cota del suelo en un entorno de terreno inestable o, al menos, sin apuntalar.

Por otro lado, destaca la observación de uno de los encuestados acerca de los contenedores de vida. De este material, de uso generalizado en ZO, se ha criticado su escaso grado de protección. El encuestado afirma que, cuando se instalan estos medios en un ambiente donde existe amenaza de ataque mediante artefactos explosivos improvisados o proyectiles (granadas de mortero, por lo general) es necesario emplear medios suplementarios, tales como planchas de madera, metal, sacos terreros o bloques de hormigón para dotar de cierta protección a esta estructura.

B.3. Resultados extraídos de la encuesta al personal del BZ XII

- I. Otro tipo de prefabricado de hormigón: es puesto de manifiesto el problema que surge a la hora de manipular elementos prefabricados de hormigón, a menudo frágiles, que sufren cierto deterioro durante su puesta en obra.
- II. Prefabricados de madera / Estructuras en madera: se destaca su elevado peso como inconveniente, así como su escasa durabilidad y su mal comportamiento ante la humedad.
- III. Contenedores de vida: su grado de protección es muy reducido y ello hace necesario el uso de medios de fortificación suplementarios.
- IV. Trabajos de excavación: la falta de medios y técnicas de apuntalamiento y estabilización del terreno provoca faltas de seguridad y reduce el grado de protección de las fortificaciones, al disminuir las posibilidades de supervivencia de refugios enterrados.

ANEXO C. Determinación de necesidades a través de problemas mediante herramientas gráficas de Ingeniería de Calidad

C.1. Diagrama Ishikawa

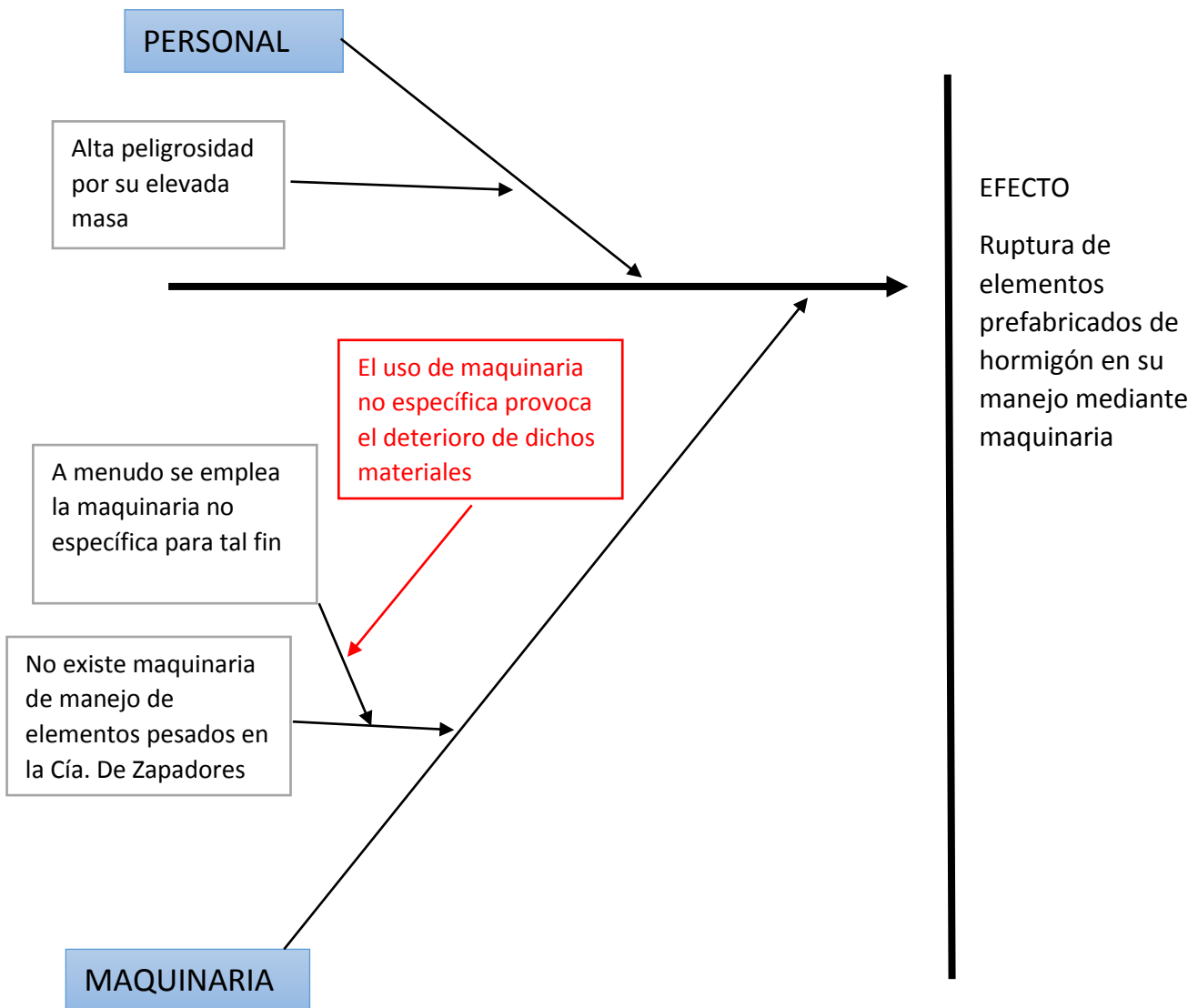


Figura 16: Diag. Ishikawa. Fuente: elaboración propia

Con este diagrama, se alcanza la conclusión de que el empleo de maquinaria no específica para desplazar los prefabricados en el momento de su puesta en obra provoca la ruptura de los mismos.

C.2. Herramienta TRIZ

Para alcanzar una solución técnica al problema, se aplicará la herramienta TRIZ (Teoría para resolver problemas de inventiva). Se ha empleado la matriz de contradicción partiendo de las siguientes características:

1. Masa del objeto a mover
2. Efectos nocivos sobre el objeto a mover
3. Versatilidad
4. Presión ejercida sobre el objeto a mover
5. Potencia de los medios de manipulación insuficiente (en el caso de mano de obra)

La herramienta arroja la posibilidad de aplicar los principios de inventiva siguientes:

Principio #6 - Universalidad: lograr que un medio u objeto realice diversas funciones. En este caso, lograr que alguna de las máquinas en dotación actúe de forma similar a una grúa o manipulador telescópico.

Principio #8 – Reducción de masa

Principio #10 – Acción preliminar preventiva: emplear un sistema de protección para los elementos prefabricados frágiles en el momento de su puesta en obra, destinado a minimizar los daños producidos por su manipulación.

ANEXO D. Tecnologías de compactación y apuntalamiento del terreno

D.1. Tierra Armada

Este método de construcción se basa en el principio de que intercalar suelo y refuerzos genera un rozamiento en los puntos de contacto entre ambos, que crea una unión permanente, dando como resultado un material compuesto de construcción.

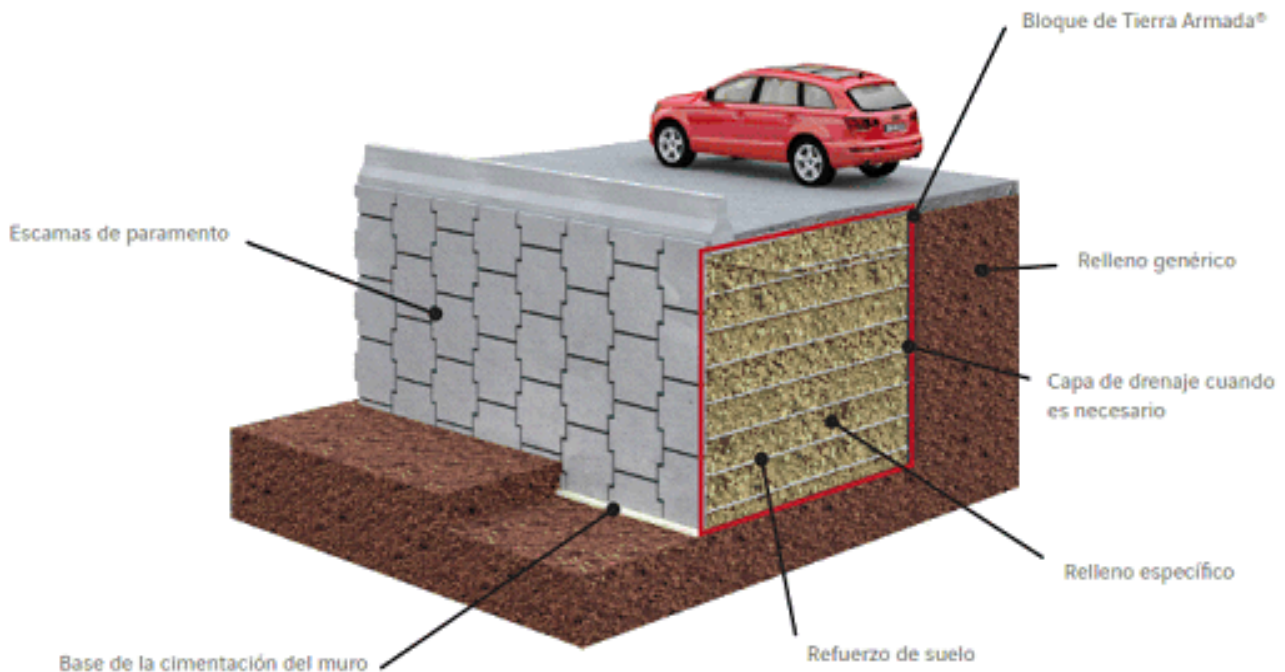


Figura 17: Ejemplo de muro de Tierra Armada. Fuente: <http://www.terre-armee.com/>

Las estructuras de Tierra Armada combinan un relleno granular seleccionado (material procedente del propio entorno donde se asentará la estructura, sometido a un análisis granulométrico, y, en caso de que su granulometría o composición no sea óptima, se aportará material de composición específica), con refuerzos de tracción y un sistema de paramento modular, elaborado generalmente con placas prefabricadas de hormigón, malla electrosoldada o paneles de acero. En definitiva, son tres elementos los que participan en esta técnica: material de relleno, refuerzos de tracción y sistema de contención. Como elementos suplementarios, puede emplearse un sistema de drenaje. Finalmente, es necesario crear una base de cimentación.

Esta combinación crea una estructura duradera de contención por gravedad que es capaz de soportar grandes sobrecargas, dinámicas o estáticas, de estructuras asociadas y vehículos (41).

Permite crear muros en suelos con poca capacidad portante, tolera asientos diferenciales y puede demolerse o repararse fácilmente, además de una ejecución rápida y un coste de ejecución competitivo. Sus principales inconvenientes son la necesidad de contar con un

material de relleno con propiedades concretas, y específicas para cada caso particular, y la corrosión de las bandas de refuerzo.

D.1.1. Proceso constructivo mediante la técnica de Tierra Armada

Para compactar el terreno, o construir un muro, se colocan de forma ordenada en un terraplén bandas de acero de refuerzo, en planos horizontales, que se unen a unas placas prefabricadas que conforman el paramento del muro. Las bandas o armaduras suelen ser de chapa metálica de varios metros de longitud (aproximadamente un 80% de la altura del muro), de 2 a 12 cm de anchura y de 3 a 5 mm de espesor. Con esta técnica se construyen muros verticales de 25 a 30 m de altura (42).

De forma expedita, puede construirse un muro con esta técnica mediante la inclusión de cualquier tipo de material de refuerzo laminar en posición horizontal entre estratos sucesivos de tierra. Sin embargo, en caso de emplearse un sistema de contención (e.g. paramento de placas de hormigón), un sistema de drenaje o aportar material para mejorar la granulometría o las propiedades físicas del terreno, aumenta de forma drástica la efectividad de esta técnica.



Figura 18: Detalle de las bandas y del paramento de un muro de Tierra Armada. .Fuente <http://www.terre-armee.com/>

La secuencia constructiva de un muro de Tierra Armada es la siguiente:

1. Excavación de la caja en el terreno. En caso de contemplarse la instalación de un sistema de drenaje, se tomará en consideración para el dimensionamiento de dicha excavación.
2. Montaje de la primera línea del sistema de contención en los laterales del muro.
3. Primera tongada de material y compactación de la misma.
4. Instalación de la primera línea de refuerzos (unión de los mismos a las placas de paramento del sistema de contención).
5. Segunda tongada y compactación.
6. Montaje de la segunda línea del sistema de contención.

Este proceso continúa de forma iterativa hasta lograrse un muro de la altura deseada. De esta forma, la tensión desarrollada dentro de la masa de tierra se transmite a las bandas de refuerzo por medio de la fricción que esta masa ejerce sobre ellas. Los refuerzos trabajan a tracción a través de las fuerzas de tensión ejercidas por el suelo.

D.1.2. Principio de la Tierra Armada

Si se deja caer una cierta cantidad de arena seca sobre una superficie horizontal, dicha arena tiende a formar un cono. La pared de este cono responderá a su ángulo de talud natural. En este caso, este ángulo depende de las propiedades y composición tanto del material arenoso depositado, como de las características de la superficie. La teoría de Coulomb (1776)

establece como criterios el grado de cohesión del suelo¹⁷, la homogeneidad de su composición, su grado de isotropía¹⁸ y el drenaje existente. Estas variables determinan el grado de fricción interna del terreno. A mayor fricción interna, mayor será el ángulo del talud natural del terreno. Esta afirmación puede comprobarse de forma intuitiva mediante el sencillo experimento de arrojar sobre una superficie dos muestras de material: la primera compuesta por material pulido (como el extraído del lecho de un río) y la segunda, por material de superficie rugosa (por ejemplo, procedente de machaqueo). La primera muestra formará un cono de menor altura y base mayor que la segunda, pues el rozamiento entre las partículas que la componen es inferior a la segunda.

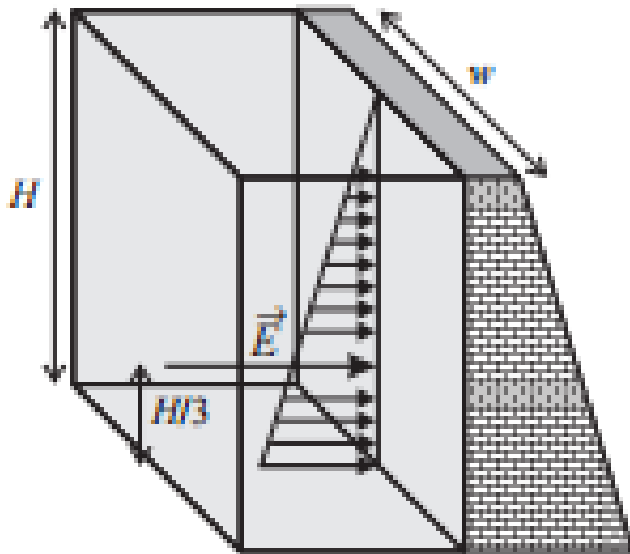


Figura 19: Distribución de fuerzas. Fuente: www.enriquemontalar.com

Además, tanto Coulomb (1776) como Rankine (1857) determinan que la distribución de las fuerzas que actúan en el interior de una masa de tierra (como un muro de contención vertical, sometido exclusivamente a la acción de la gravedad) es triangular y paralela al suelo. Es decir, el empuje vertical de la gravedad se traduce en un vector horizontal hacia el exterior de la masa de tierra, que aumenta su módulo con la proximidad al suelo.

La Tierra Armada basa su funcionamiento en el incremento del rozamiento interno, mediante la inclusión de elementos en su interior. El principio fundamental en que se basa esta técnica es el de la sustentabilidad del terreno a través de la fricción entre los elementos de refuerzo y el propio terreno. Las fuerzas horizontales antes mencionadas se transmiten a las bandas de refuerzo a través del rozamiento entre su superficie y el propio terreno. Estas fuerzas transmitidas a los refuerzos se traducen en esfuerzos de tracción sobre los mismos. Por tanto, esta distribución de fuerzas triangular incremental antes mencionada pasa a ser una distribución en forma de sierra, pues los esfuerzos se distribuyen entre las diferentes capas de flejes instalados.

El conjunto se comporta como si tuviera una cohesión proporcional a lo largo de la dirección de los refuerzos. Sin embargo, suponiendo un muro de contención con una cara apoyada en el talud natural y otra libre, la tensión es diferente en el extremo del refuerzo más cercano al talud natural (es cero) respecto al extremo donde éste se une al paramento (dependiente de la cantidad de refuerzos que contenga cada pieza del paramento). Ello demuestra que los elementos más importantes en estas estructuras son las bandas de refuerzo, pues son las

¹⁷ Depende fundamentalmente del grado de material arcilloso en su composición.

¹⁸ Un material isótropo tiene las mismas propiedades en todo su volumen y en todas direcciones.

que soportan los esfuerzos principales. Esta interacción entre terreno y refuerzos permite que dicha masa de tierra se comporte como un material elástico con una gran mejora en la resistencia a la fractura.

D.2. Propuesta de empleo en obras de fortificación militar

Desde el punto de vista de la fortificación militar, uno de las ventajas más importantes de los muros de Tierra Armada está en su gran flexibilidad. Esta estructura es capaz de soportar deformaciones sin presentar problemas estructurales de entidad, debido al comportamiento elástico del terreno estabilizado. Esta elasticidad del terreno viene determinada por la de los flejes empleados como refuerzo. En función del material empleado en los mismos, y de su límite de fluencia, el muro podrá soportar mayores deformaciones antes de sufrir daños estructurales. En el campo de la construcción, la naturaleza flexible de los muros de Tierra Armada hace que esta estructura sea adecuada para los casos en que, por propia naturaleza del terreno, se esperen asentamientos diferenciales en la cimentación. También ha tenido un gran resultado su uso en áreas de gran actividad sísmica.

Por ello, se trata de un método de fortificación a considerar en despliegues militares donde sean necesarios movimientos de vehículos pesados en las inmediaciones de la fortificación o sobre las propias estructuras, debido a que la presión ejercida por estos vehículos sobre el terreno tiende a producir depresiones en el mismo, lo cual perjudica las construcciones con cimentaciones poco flexibles.¹⁹

La construcción de muros con esta técnica en el ámbito civil ha sido objeto de diversas normalizaciones. Los muros de Tierra Armada tienen una vida útil próxima a los 50 años, y precisan para su construcción de un estudio detallado del terreno, realizado en un laboratorio de suelos con material especializado (43). No obstante, y debido al carácter temporal de las obras de fortificación militares, y a la limitada disponibilidad de medios de análisis de suelos, el diseño de muros mediante la técnica que nos ocupa puede realizarse de forma expedita.

Dado que las obras de fortificación se encuentran estandarizadas hasta cierto grado, se debe contemplar el diseño y configuración de módulos de estabilización del terreno. Con vistas a una logística optimizada, se propone comenzar dotando a las Unidades de Zapadores de un "Módulo Básico" de componentes para apuntalar terrenos y realizar estructuras elementales de fortificación.

D.3. Empleo de materiales compuestos en los medios de estabilización del terreno

El principal problema que presenta el empleo de materiales compuestos frente al acero es su elevado coste. La fibra de vidrio unidireccional (FVUD) ha sido seleccionada para este trabajo, por su menor coste respecto de la fibra de carbono, y sus propiedades similares.

¹⁹ Como ejemplo, en la Base Militar "El Goloso", donde es habitual el tráfico de vehículos pesados (TOA M-113, CC "Leopardo", CZ "Alacrán", etc.) se prohíbe la circulación de los mismos cerca de los muros exteriores de ciertas edificaciones, y deben guardar una distancia de seguridad respecto de los bordillos de las carreteras adoquinadas.

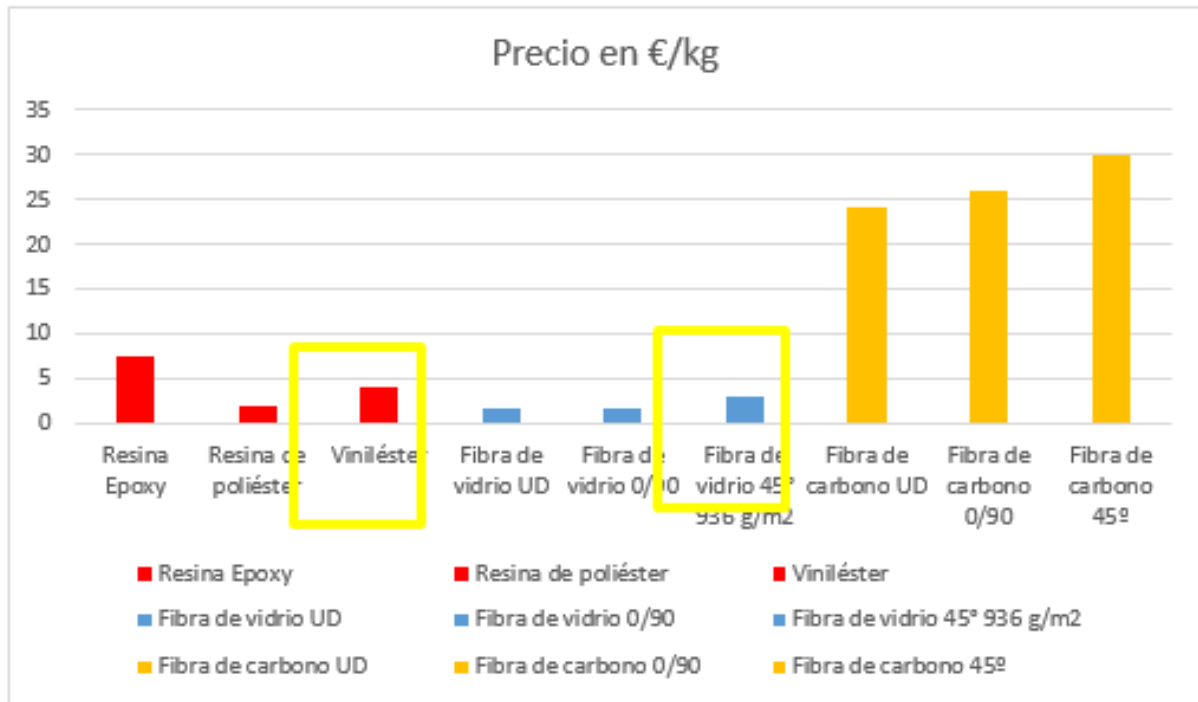


Figura 20: Coste materiales compuestos. Fuente: elaboración propia.

En España, la Universidad Politécnica de Madrid ha realizado un estudio experimental de la fricción superficial entre materiales compuestos y dos tipos de suelos característicos de la ciudad de Madrid. Los ensayos de rozamiento realizados en laboratorio indican que la rugosidad de las placas del material compuesto es el factor que más influye para cada tipo de suelo. Tanto la arena tosquiza como la arena de miga, presentan un rozamiento adecuado con los materiales compuestos empleados en el ensayo y ambos tipos de tierra pueden ser empleados en estructuras de tierra mecánicamente estabilizada (44).

Además de la adecuada interacción con el terreno que acabamos de mencionar, los materiales compuestos presentan características de ligereza, robustez y resistencia, mecánica y química, muy adecuadas para su utilización en esas estructuras de tierra. Aunque su empleo en construcción y obra civil está suficientemente documentado, su utilidad para fabricar componentes de tales estructuras de tierra parece un campo bastante innovador. Una simulación por software de una estructura de tierra mecánicamente estabilizada, comparando el comportamiento de la estructura realizada con elementos típicos, revestimiento de hormigón y bandas de refuerzo de acero, y de una estructura en base a materiales compuestos, muestra que los materiales compuestos se comportan con algo menos rigidez que los materiales típicos, pero dentro de las tolerancias admitidas para este tipo de construcción. No obstante, se propuso realizar mediciones sobre un prototipo de estructura real con materiales compuestos para verificar los resultados de la simulación. Dicho prototipo fue fabricado e instalado por el Centro Tecnológico de I+D+i de la empresa Acciona.

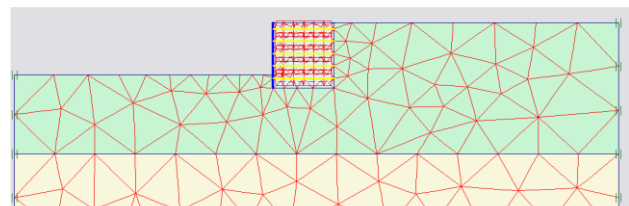


Figura 21: Malla de elementos finitos definida para análisis de muro de tierra mecánicamente estabilizada. Fuente: Jara Mori, G. (2008). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras. Universidad Politécnica de Madrid.

La estructura elegida se dimensionó con una altura de 4 m y una longitud máxima de 19,50 m, un revestimiento cubierto por placas de 1,50 x 1,50 m (en 3 filas, la primera de un metro de altura), y bandas de refuerzo de 3,20 m de longitud, separadas verticalmente entre sí 0,75 m. En el prototipo se contempló la utilización de paneles tipo "sandwich", con núcleo de poliuretano y láminas de fibra de vidrio y resina de poliéster sobre tela, así como bandas de refuerzo también de fibra de vidrio con poliéster. Estos compuestos fueron elegidos para el prototipo por sus buenas propiedades mecánicas y químicas y su precio de fabricación no elevado.

Cada panel "sandwich", de 10 cm de espesor y 33,75 Kg de peso, del prototipo estaba formado por un alma de dos capas de poliuretano con una densidad de 70 Kg/m³, revestida con dos láminas de compuesto a base de fibra de vidrio (gramaje 500 g/m²) y resina de poliéster. El compuesto de las bandas de refuerzo comprende un laminado de dos capas de fibras de vidrio dispuestas unidireccionalmente (gramaje 600 g/m²) y de resina de poliéster, laminado que se reforzó en la zona de unión de la banda de refuerzo al panel "sandwich" con cuatro capas adicionales de fibra de vidrio 0/90 y la resina de poliéster (28).

De los resultados de las pruebas, se deduce que el empleo de los materiales compuestos en estructuras de contención de tierras es una alternativa técnicamente viable y sujeta a un desarrollo importante, dada las ventajas comparativas de estos materiales respecto a los de uso tradicional.

Por ello, aparte de conocer los estudios teóricos en el campo de los materiales compuestos, nos hemos propuesto analizar los productos, basados en dichos materiales, que actualmente se encuentran en el mercado para levantar estructuras de contención de tierras. Al igual que en el estudio que ya hemos llevado a cabo sobre la técnica de Tierra Armada, el objetivo que ahora perseguimos es deducir la posibilidad del uso de productos comerciales fabricados en materiales compuestos por parte de las Unidades de Zapadores.

Siguiendo con el prototipo anteriormente mencionado, se han buscado diversas formas de resolver el problema de la unión entre los paneles y los flejes. En una primera versión, el panel incluye los conectores en un sistema de machihembrado horizontal, con una parte macho y una parte hembra del conector conformando el panel, formando así ambas partes una única pieza. En una segunda versión, los conectores son piezas independientes de los paneles; así, la conexión entre las bandas de refuerzo y los paneles se realiza mediante dichos conectores y dichas bandas se fijan a los conectores mediante los perfiles conectores.

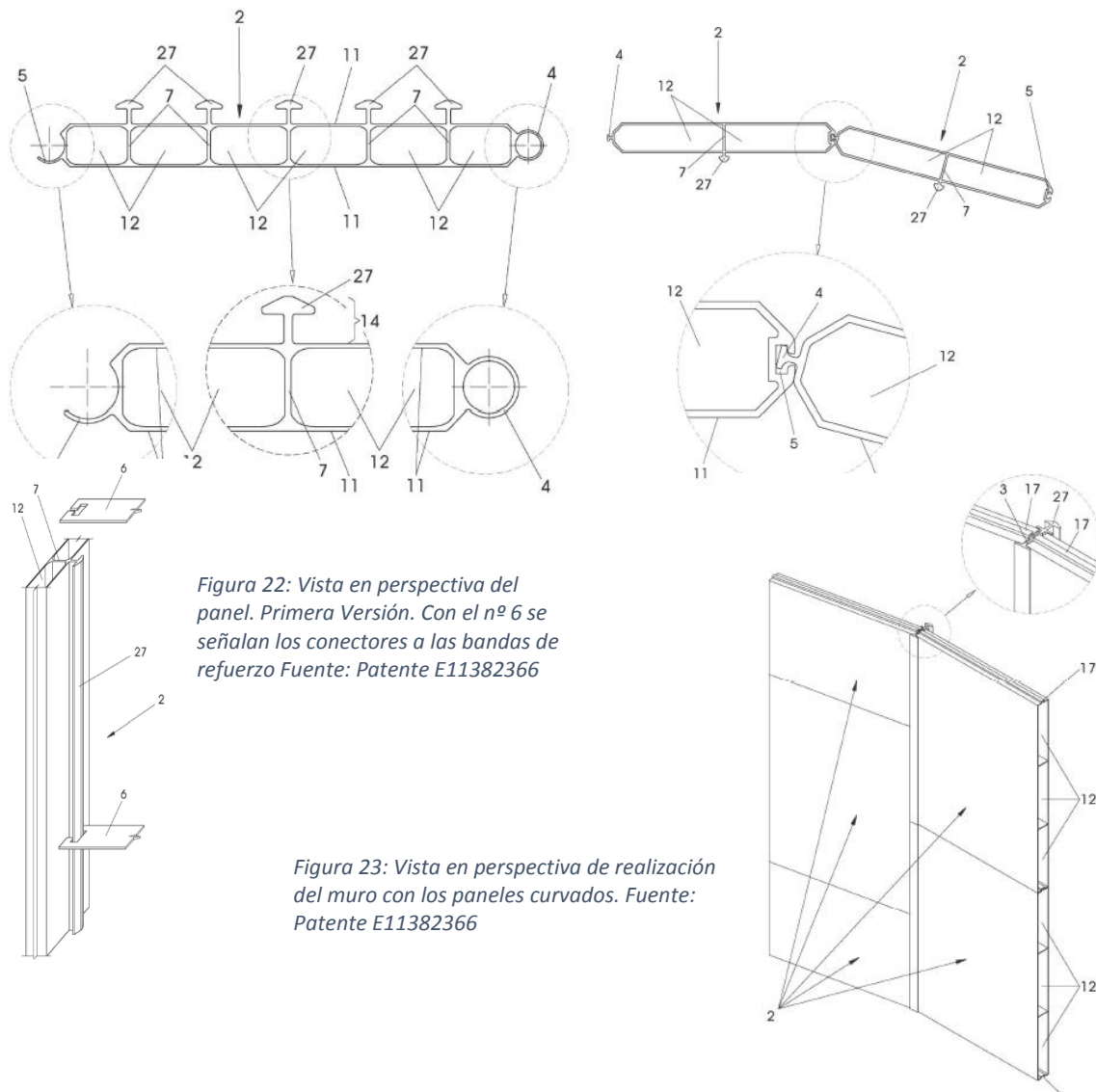


Figura 22: Vista en perspectiva del panel. Primera Versión. Con el nº 6 se señalan los conectores a las bandas de refuerzo Fuente: Patente E11382366

Figura 23: Vista en perspectiva de realización del muro con los paneles curvados. Fuente: Patente E11382366

Un producto de reciente aparición en el mercado, reemplaza los clásicos paneles de hormigón de los revestimientos por piezas plásticas de pequeño tamaño. Al igual que en la invención que acabamos de ilustrar, estas piezas se unen entre sí mediante perfiles de conexión. El elemento interno de la pieza de revestimiento tiene un hueco que se rellena de tierra. A su vez, la pieza interna se une a un panel que formará la cara externa de la estructura, y que puede adoptar diversas formas según las necesidades. Por otro lado, estas piezas se unen a elementos de refuerzo embebidos en el terreno, que se va compactando tras colocar cada fila de paneles y refuerzos. Este producto se ha utilizado en EE.UU. para construir estribos de puentes.

Gracias a los avances de la investigación, también las bandas de refuerzo fabricadas en nuevos materiales poliméricos han comenzado a tener amplia difusión en el mercado, sobre todo por sus características de baja elongación, baja tendencia al deslizamiento, buen comportamiento en términos de resistencia mecánica y química, así como baja sensibilidad a los ciclos seco-húmedo.

Normalmente, estas bandas de refuerzo se componen de canales compactos de fibras de material polimérico dispuestos ordenadamente en una matriz de polímero más simple, que actúa de envuelta del producto. El material es especialmente resistente a la presencia de sales en el terreno y muy adecuado para emplear donde el material de relleno de las estructuras de suelo estabilizado sean muy alcalinas.

Dos tipos de bandas de refuerzo son los de mayor empleo en contención de terrenos actualmente: los refuerzos compuestos por fibras de alcohol de polivinilo (PVA) envueltas por una vaina de polietileno y los refuerzos a base de fibras de poliéster envueltas, también envueltas por una vaina de polietileno. (45)

ANEXO E. Tratamiento de protección de superficies mediante poliurea

E.1. Producto propuesto

La poliurea es un tipo de polímero sintético obtenido de la reacción de un diisocianato con una diamina, en una reacción de polimerización por condensación similar a la del poliuretano, excepto porque en el caso que nos ocupa el enlace formado corresponde al enlace urea. La poliurea puede alcanzar grandes elongaciones y alta resistencia a la abrasión, por lo que su uso como recubrimiento de protección se encuentra muy extendido. Dentro de la familia de las poliureas existen diferentes polímeros, diferenciados por el número y tipo de grupos presentes. Cada uno de los mismos reúne propiedades y características concretas, que lo hacen apto para aplicaciones específicas.

La poliurea, en función de su estructura química, puede ser de dos tipos: alifática o aromática. La poliurea aromática es más tenaz, aunque no resiste a la exposición de los rayos UV, produciéndose cierta decoloración y pérdida de brillo, lo que no la hace recomendable para aplicaciones “cara vista”. Por el contrario la poliurea alifática es resistente a la radiación UV por lo que es excelente como capa de acabado. (46)

Existen múltiples marcas comerciales que distribuyen tratamientos con poliurea para usos de protección de superficies. En este anexo se hará una exposición breve de un producto recomendado, así como de un posible método de aplicación.

La casa a la que se ha consultado ha sido Tecnopol Sistemas S.L. Se trata de una empresa situada en Parets del Vallès, especializada en maquinaria para proyección e inyección de poliuretano de alta y baja presión, así como en tratamientos de protección superficial mediante sistemas líquidos empleando polímeros de alta tecnología. Se ha recurrido a los asesores de la mencionada casa comercial para definir qué tipo de poliurea es más adecuada para estas aplicaciones.

Los requisitos que se han planteado han sido:

- I. Se busca un producto resistente a la abrasión. Dado que los actuales Teatros de Operaciones de las FAS se sitúan en escenarios desérticos, donde es habitual la abrasión de las superficies expuestas a la acción del viento debido al arrastre de material arenoso por el mismo, se busca un producto que garantice la resistencia a dicha contingencia con una pérdida de masa mínima y una pérdida de espesor reducida.
- II. El producto solicitado debe aumentar la protección frente a proyecciones de metralla, detonaciones próximas de pequeña y mediana entidad e impactos de bala.
- III. El tratamiento recomendado debe poder aplicarse con medios reducidos y sencillos, permitiendo la reparación de desperfectos sobre el terreno, sin necesidad de evacuar los materiales tratados.

Dadas las mencionadas prescripciones técnicas, se ha recomendado el tratamiento mediante poliurea TECNOCOAT P-2049. Entre sus ventajas, destaca la de ser un tratamiento único: además de protección frente a impactos, ofrece impermeabilización de la superficie tratada y sellado de la misma. Se trata de un producto líquido, suministrado en dos contenedores separados. El recubrimiento se forma con dos componentes altamente

reactivos en formato líquido, isocianatos y aminas, pulverizados a través de un equipo reactor de proyección, para formar una membrana sólida, completamente continua, sin juntas ni solapes. (47)

Sus principales propiedades, de acuerdo al fabricante, se enuncian a continuación.

espesor recomendado	±2 mm
secado inicial a 23°C	± 5 segundos
vida útil de sistema	W3, 25 años
resistencia tracción a 23°C	± 23 MPa
elongación a 23°C	>300%
dureza Shore A a 23°C	>90
método de aplicación	equipo reactor alta presión
COV	0



Tabla 9: Características poliurea Tecnocoat. Fuente: Corporativa, R. I., Manzano, Z., Fuente, A., & Humano, C. (2016). Ficha técnica Tecnocoat P-2049. Barcelona: Tecnopol. Retrieved from www.tecnopol.es

E.1.1. Características generales más destacadas

Entre las características presentadas por el fabricante en la ficha técnica de producto, merecen especial mención las siguientes:

La empresa Tecnopol garantiza la durabilidad del tratamiento, hasta un periodo de 25 años para un espesor mínimo de 1,4 mm. Además, se certifica su adherencia sobre cualquier superficie limpia y firme, citando entre ellas: hormigón, cerámica, metales, espuma de poliuretano, madera, láminas asfálticas/bituminosas, materiales cementosos y pinturas acrílicas.

Conforme al Código Técnico de la Edificación, y según el documento básico DB SUA 1, Clase 3 ENV 12633:2003, ofrece la posibilidad de formación de acabados anti deslizantes añadiendo partículas sólidas. En este Documento Básico se establece la normativa referente a resbaladidad de los suelos, o resistencia al deslizamiento (Rd) de una superficie.

E.1.2. Limitaciones del producto

A continuación se enuncian las principales limitaciones que presenta este tratamiento, deducidas de la ficha técnica de producto:

El sistema TECNOCOAT P-2049 necesita de una protección a la radiación solar (rayos UV) para mantener sus propiedades físico-mecánicas, ya que se trata de una membrana aromática. Por este motivo, la marca ofrece un sistema en el que figura la aplicación final de una resina de poliuretano alifático (recomendada TECNOTOP 2C/2CP) en los casos de no existir protección con otros elementos físicos.

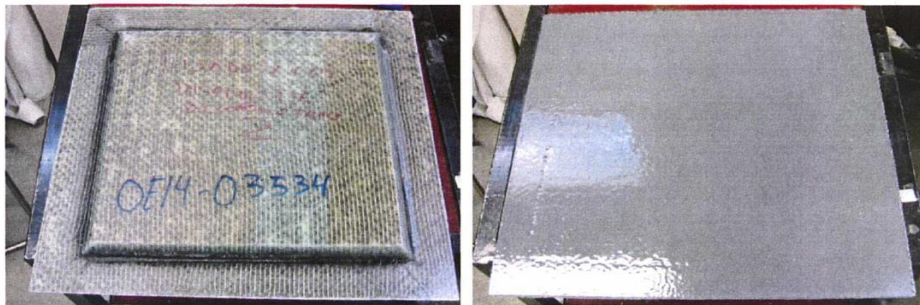
Además, su periodo de caducidad es de 12 meses, y precisa de unas condiciones de temperatura de entre 5°C a 25°C en ubicaciones secas para obtener un acabado en condiciones óptimas.

E.1.3. Certificaciones y ensayos de producto

El producto TECNOCOAT P-2049 se encuentra certificado por numerosas instituciones internacionales. Entre las mismas, destacan: certificación de producto por el British Board of Agreement (BBA) con número de certificado 16/5340, certificación con 25 años de garantía por la Organización Europea de Asesoría Técnica (EOTA), sello de Conformidad Europea y cumplimiento de la norma UNE-EN 1504-2 de productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón emitida por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

Por otro lado, la Fundación Cidaut, especializada en investigación y desarrollo en el sector del transporte y la energía, ha llevado a cabo un ensayo de resistencia a impacto sobre una superficie metálica tratada con poliurea. (48) El mencionado ensayo refleja el excelente comportamiento de la poliurea como recubrimiento protector frente a impactos de proyectiles.

Para tal ensayo, se empleó un proyectil esférico de 80g, proyectado a una velocidad de 83 m/s. La muestra se colocó en un ángulo de incidencia no superior a 30°.



Placa 1- OE14-03534

Figura 24: Ensayo de resistencia a impacto. Muestra inicial. Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo en Automoción. (2014). Informe de Ensayo de Impacto de Balasto IE-E14_1579. Retrieved from www.cidaut.es

FOTOS POST TEST

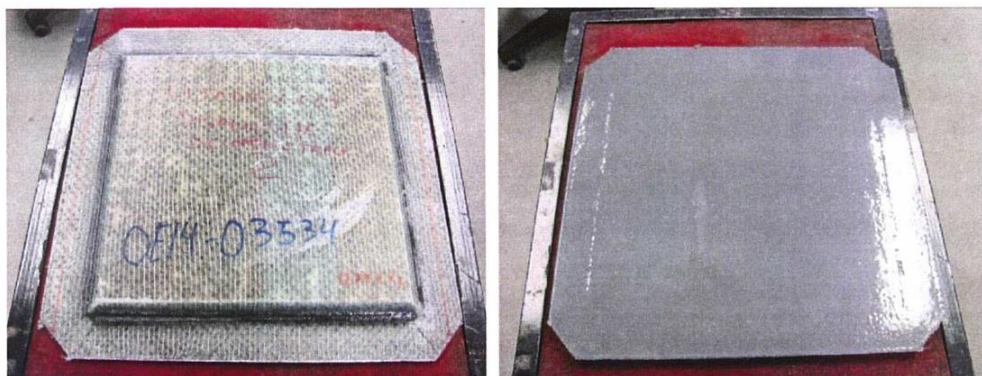


Figura 25: Ensayo de resistencia a impacto. Muestras finales. Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo en Automoción. (2014). Informe de Ensayo de Impacto de Balasto IE-E14_1579. Retrieved from www.cidaut.es

Comportamiento de los objetos sometidos a ensayo	REQUISITO	OK	No OK
Delaminación del material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Desprendimientos de material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Agujeros de material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rotura del recubrimiento	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fragmentación del recubrimiento	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

RESULTADO FINAL	<input checked="" type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> NO OK
------------------------	---	---------------------------------------

OE14-03536

Comportamiento de los objetos sometidos a ensayo	REQUISITO	OK	No OK
Delaminación del material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Desprendimientos de material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Agujeros de material	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rotura del recubrimiento	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fragmentación del recubrimiento	NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

RESULTADO FINAL	<input checked="" type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> NO OK
------------------------	---	---------------------------------------

Figura 26: Ensayo de resistencia a impacto. Evaluación. Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo en Automoción. (2014). Informe de Ensayo de Impacto de Balasto IE-E14_1579. Retrieved from www.cidaut.es

Por otro lado, y como requisito prioritario, se ha solicitado que el producto posea una elevada resistencia a la abrasión, debido a que su escenario de uso es el ambiente desértico, donde la acción erosiva de los materiales en suspensión arrastrados por los fuertes vientos es máxima. Para garantizar la resistencia del producto, se ha recurrido a ensayos de resistencia a la abrasión del mismo, realizados por la empresa Tecnalia en el año 2014.

Para determinar la resistencia a la abrasión de la poliurea, se llevaron a cabo ensayos de erosión con partículas abrasivas de silicato de aluminio para caracterizar el comportamiento de 3 materiales diferentes. Cada uno de esos ensayos se realizó por triplicado, dando lugar a un total de nueve pruebas. Todos los ensayos se diseñaron bajo los criterios de la norma ASTM G76-95 (*Standard Test Method for conducting Erosion Tests by solid particle impingement using gas jets*) y la militar MIL-STD-810F (*Environmental Engineering considerations and laboratory tests*).

Se emplea una boquilla proyectora de material abrasivo sobre una muestra plana de poliurea, aplicada sobre una superficie lisa. La distancia entre la boquilla de proyección y las muestras se mantuvo fija a 210 mm, siendo el ataque del abrasivo de forma perpendicular con la superficie de la muestra. La granalla utilizada fue Silicato de Aluminio de 80 a 160 micras. El equipo empleado consta de una máquina de chorro, capaz de proyectar partículas a una velocidad de 150 m/s.

Las muestras difieren en el método de aplicación (pistola o rodillo), de modo que sea posible evaluar si ambos materiales se comportan de la misma forma en cuanto a propiedades físicas del material y si puede operar bajo condiciones de abrasión sin degradar su eficacia, fiabilidad y facilidad de mantenimiento en cuanto a rendimiento se refiere.

El método para estudiar la erosión consiste en un pesado inicial de cada muestra mediante una balanza. Posteriormente, se lleva a cabo la proyección de granalla durante 10s. Finalmente, se lleva a cabo una limpieza suave de la superficie erosionada. Con ello, se obtiene el resultado erosivo sobre la muestra.

Posteriormente, se lleva a cabo una pesada de la muestra final con la balanza, a fin de discernir qué masa de material se ha perdido. Por añadido, se emplea un perfilómetro Dektak (05-483.1) para conocer el perfil de la superficie erosionada mediante perfilometría de contacto.

Los resultados son los siguientes:

I. Tras la proyección de la granalla citada durante 300s a 150 m/s no se ha llegado al sustrato. La capa de poliurea protege la superficie del contacto con el material erosivo.

II. La muestra tratada con poliurea P-2049 sufre una pérdida de masa un 250% inferior a la de la muestra compuesta por un panel sándwich formado por una capa de aramida, vidrio y espuma de PVC.

III. Del análisis del perfil erosionado se puede observar que las refs. 3M presentan un perfil negativo, es decir se forma un hoyo tras la erosión, diferente a lo que ocurre en la ref. P-2049 donde su comportamiento plástico muestra un abombamiento en la zona erosionada por acumulación de abrasivo y ligeros puntos donde se levanta parte del material llegando a profundidades de 70-80 μm .



Figura 27: Abrasión. Estado inicial de las muestras. Fuente: Tecnalia. (2014). Estudio de resistencia a la abrasión por arena de recubrimientos de poliurea (No. 40090).

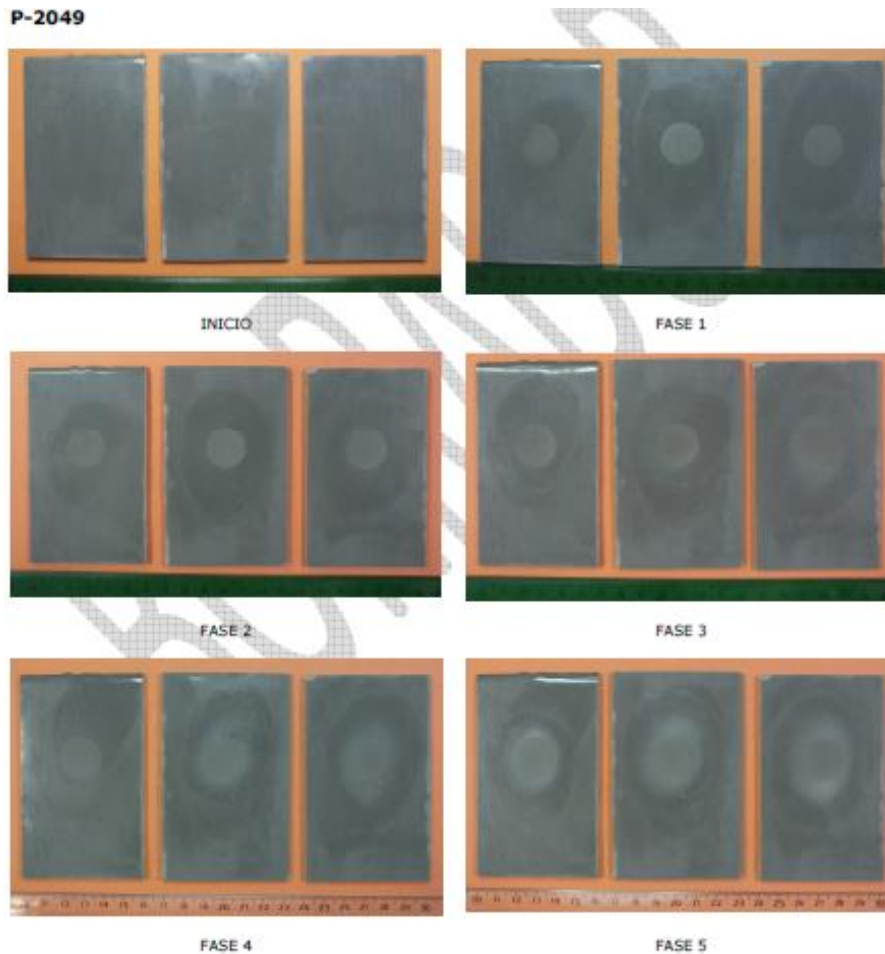


Figura 28: Estado final muestras. Fuente: Tecnalía. (2014). Estudio de resistencia a la abrasión por arena de recubrimientos de poliurea (No. 40090).

E.2. Procedimiento de aplicación sobre soporte metálico

Dado que el presente estudio ha contemplado la aplicación de este tratamiento sobre la superficie de un contenedor de vida, se ha definido el proceso óptimo de aplicación sobre superficies metálicas lisas.

En primer lugar, las superficies metálicas deben ser preparadas por medio de chorro de arena, para de esta forma, mejorar el anclaje mecánico de la superficie. A continuación, para la limpieza rápida y efectiva de la superficie, se debe utilizar disolvente con base cetona. Seguidamente, y de forma opcional, es recomendable aplicar una resina epoxi con base agua a modo de imprimación, para, de este modo, mejorar la adherencia y características de la planimetría del soporte. Finalmente, se procede a la aplicación de forma homogénea de la membrana TECNOCOAT P-2049, para lograr el grueso deseado en la totalidad de la superficie. Como se ha mencionado, a fin de aumentar la durabilidad de la poliurea aromática, se recomienda la aplicación de una capa de resina de poliuretano alifático TECNOTOP 2C, en los consumos y gruesos deseados, en el caso de no haber protección frente los rayos UV.

E.2.1. Sistema de aplicación

Se empleará un equipo de proyección de alta presión. Los parámetros más generales de este equipo serán los siguientes

Temperatura de calentador isocianato: $\pm 75\sim 78$ °C
Temperatura de calentador aminas: $\pm 65\sim 67$ °C
Temperatura de mangueras: $\pm 70\sim 73$ °C
Presión: 2.700~2.900 psi (180~200 bar)

Tabla 10: Condiciones del equipo aplicador. Fuente: Graco. (2007). Manual de Dosificador multicomponente eléctrico calefactado (No. 313147T). Minneapolis. Retrieved from www.graco.com

Estos parámetros de temperaturas y presiones, tienen que ser valorados, ratificados o ser variados ligeramente por el agente aplicador, en función de los condicionantes de cada zona climática, situación climatológica o según especificaciones del equipo de proyección.

Se ha solicitado a la empresa Tecnopol la recomendación de un dosificador eléctrico, bajo las premisas de: precio no superior a la media del sector, alimentación eléctrica con un rango de tensiones de funcionamiento del entorno de la red eléctrica nacional, portátil, robustez elevada, mantenimiento sencillo y facilidad de uso. Como resultado, los asesores consultados han recomendado el modelo E-XP2 de la casa Graco. La empresa Specialty Products Incorporated también recomienda el empleo de dosificadores de la marca Graco en cualquiera de sus versiones. (49)

El modelo E-XP2 opera en un rango de tensiones nominales entre 200 y 240 V, cumpliendo así las prescripciones propuestas y pudiéndose emplear alimentado mediante la red nacional española, sin necesidad de transformador. Su masa en vacío es de 198 kg, siendo relativamente sencillo de transportar. Destaca por su sistema de remoción rápida de las bombas inferiores, lo que posibilita un mantenimiento más eficaz, sencillo y rápido que el de otros modelos. (50)

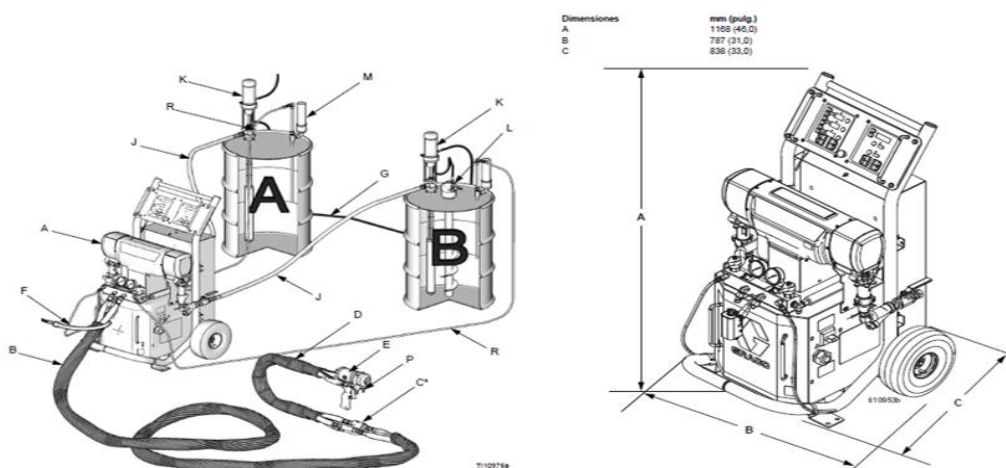


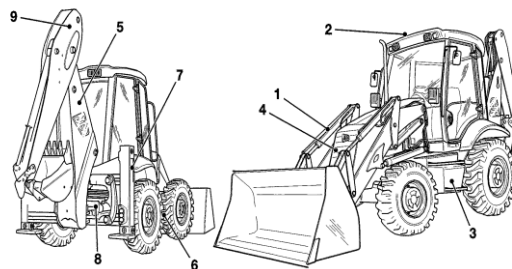
Figura 29: Sistema de difusión GRACO. Fuente: Graco. (2007). Manual de Dosificador multicomponente eléctrico calefactado (No. 313147T). Minneapolis. Retrieved from www.graco.com

ANEXO F. Ampliación de funciones de la retroexcavadora para su uso como grúa

La experiencia del BZ XII en el manejo de elementos prefabricados indica que, en muchas ocasiones, dichos elementos se deterioran debido al empleo de maquinaria no específica. Por ello resulta importante que la retroexcavadora de la que se dispone en dotación en la Unidad pueda actuar también como grúa y elevar cargas de cierto peso.

El BZ cuenta con la cargadora/retroexcavadora modelo 3CX fabricada por la empresa multinacional británica JCB (51). La cargadora/retroexcavadora es una máquina autopropulsada sobre ruedas, cuya estructura principal está diseñada para llevar un cazo cargador instalado en el frente y una retroexcavadora montada en la parte de atrás. Al emplearla en el modo retroexcavadora, la máquina

Cargadora-retroexcavadora JCB



- 1 Brazo de la cargadora
- 2 Cabina ROPS/FOPS
- 3 Depósito de líquido hidráulico
- 4 Compartimiento de baterías
- 5 Pluma
- 6 Depósito de combustible
- 7 Estabilizadores
- 8 Montante
- 9 Balancín

Figura 30: Vistas de retroexcavadora. Fuente: JCB. (n.d.). Manual del operador JCB 3CX. Retrieved from www.jcb.com

excava normalmente bajo el nivel del suelo con el movimiento del cazo hacia la máquina. Al emplearla en el modo cargadora, la máquina carga y excava con el movimiento hacia el frente de la máquina, para luego elevar, transportar y descargar el material.

La carga y elevación de elementos prefabricados con el cazo ancho frontal es problemática, ya que no permite el desplazamiento lateral y longitudinal, a no ser que se mueva la máquina sobre sus ruedas. Este uso, aparte de poco práctico, puede resultar en daños para el material y las personas.

No obstante, la retroexcavadora en su configuración actual puede manipular ciertas cargas mediante su brazo hidráulico y balancín situados detrás. Este uso como grúa sólo está admitido si se emplea un gancho o grillete adecuado y si la máquina ha sido probada y certificada para su carga de trabajo admisible correspondiente.



Figura 31: Retroexcavadora militar. Fuente: www.google.es

F.1. Carga de trabajo admisible

La carga de trabajo admisible indicada en ciertos accesorios para izar, como cadenas o eslingas, no es la carga admisible propia de la máquina. Dicha carga admisible ha de calcularse siguiendo lo indicado en el manual de servicio. Es decir, si se van a elevar cargas con el cazo montado, deberá restarse del valor de la carga máxima el peso del mismo cazo. En caso de empleo de un gancho "Quickhitch", o de enganche rápido, deberá sustraerse de la carga máxima el peso de dicho gancho. En todos los casos, con esta configuración la carga máxima que puede izarse con la cargadora utilizándola como grúa es de 1.000 Kg (51).

Los valores a tener en cuenta por los usuarios son proporcionados por el fabricante, y se encuentran reflejados en la Tabla 12.

Dimensiones y pesos del cazo retroexcavadora

Cazos de uso general (perfil normal)

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
305	0,06	0,05	95
400	0,09	0,07	108
455	0,12	0,09	112
610	0,17	0,13	138
800	0,24	0,17	160* vea ADVERTENCIA
950	0,29	0,21	178* vea ADVERTENCIA

Cazos de uso general (perfil normal)

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
305	0,06	0,05	95
400	0,09	0,07	108
455	0,12	0,09	112
610	0,17	0,13	138
800	0,24	0,17	160* vea ADVERTENCIA
950	0,29	0,21	178* vea ADVERTENCIA

Cazos de uso general (perfil profundo)

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
305	0,09	0,07	117
400	0,13	0,11	124
455	0,15	0,13	133
610	0,23	0,18	156
800	0,32	0,24	186* vea ADVERTENCIA
950	0,39	0,30	207* vea ADVERTENCIA
1100	0,47	0,34	229* vea ADVERTENCIA

Cazos de explanación

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
1525	0,18		148
1830	0,30		168* vea ADVERTENCIA

Cazo de mandíbulas

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
305	0,07	0,06	230
460	0,14	0,12	260
600	0,20	0,17	288

Cazos aguzados para zanjas

Anchura	Capacidad nominal	Capacidad al ras	Peso
mm	m ³	m ³	kg
1067	0,12	-	109
1676	0,07	-	192

Enganche Quickhitch en la excavadora

Manual - 80 Kg

Hidráulico - 88 Kg

Tabla 11: Cazos JCB. Fuente: JCB. (n.d.). Manual del operador JCB 3CX. Retrieved from www.jcb.com

Como se ha observado, los cazos pueden alcanzar masas del orden de los 200 kg. Esta cifra, sumada a la masa del propio enganche de izado, que ronda los 80 kg; ha de sustraerse de la carga máxima admisible de izado del brazo hidráulico. Por ello, se obtiene una carga de izado efectiva escasamente superior a los 700 kg. En caso de reemplazarse este cazo por un implemento específico, además de obtenerse funcionalidades y características adicionales (posibilidad de manejo vertical mediante la recogida de un cable, mayor seguridad para el personal, no es necesario disponer de eslingas o cadenas, etc.), la carga máxima de izado se ve incrementada.

De esta información se deduce que la capacidad de izado y amplitud de movimientos quedan limitados si la máquina se emplea en su configuración actual. Para obtener la potencia y capacidad de transporte adecuada, así como la posibilidad de movimiento tridimensional, será necesario añadir accesorios específicos.

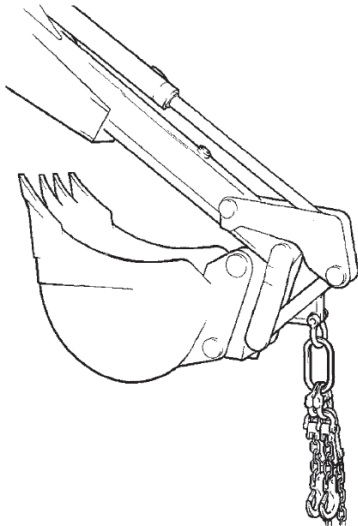


Figura 32: Empleo de cadena para izado. Fuente: JCB. (n.d.). *Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial*. Retrieved from www.jcb.com

Por ejemplo, actualmente para utilizar cadenas de izado, sin otros accesorios, y con el cazo correspondiente montado, deben unirse esas cadenas al gancho situado en el extremo del balancín. El movimiento de elevación de la carga se consigue subiendo el balancín y para trasladar la carga hacia dentro o hacia fuera, de forma limitada, habrá que recoger o abrir el cazo.

F.2. Implementos para el izado de cargas

Para comenzar a obtener mayor funcionalidad, el accesorio más sencillo es el gancho de grúa mecánico que puede instalarse en el extremo del balancín, una vez retirado el cazo para excavar. Si se combina este gancho con el balancín extensible, se posibilita un mayor alcance de los movimientos hacia arriba y hacia delante en modo grúa, teniendo en cuenta que para manipular cargas grandes la máquina queda fija sobre el terreno y sus estabilizadores han de estar desplegados.



Figura 33: Gancho-grúa. Fuente: JCB. (n.d.). *Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial*. Retrieved from www.jcb.com

Por su parte, la pluma articulada permite pivotar el brazo hasta 30 grados a cada lado de la línea central de la máquina, lo que permite una mayor facilidad y precisión para colocar las cargas en el lugar deseado.

La capacidad de carga máxima del gancho de grúa es de 1 Tm si se monta en el balancín. En caso de que el gancho se instale sobre las horquillas adicionales, que pueden añadirse a los brazos de la pala, en la parte delantera de la máquina, la capacidad máxima llega a 4 Tm:

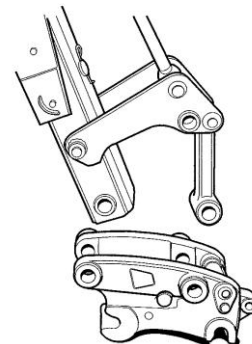


Figura 34: Implemento balancín. Fuente: JCB. (n.d.). *Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial*. Retrieved from www.jcb.com

Part number	For	Mount	For carriage type	Capacity t
993/50100	520-40, 524-50, 527-55	Carriage mounted	Compact tool carrier	1.0*
545/70200+	531-70 up	Fork mounted	Various	4.0*

Tabla 12: Capacidad de carga por implemento. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com

El montaje del gancho de grúa sobre la pala permite, por tanto, cargar pesos mayores, aunque se pierde la versatilidad y precisión de movimientos que proporciona el montaje sobre el balancín.



Figura 36: Implemento carretilla elevadora. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com



Figura 35: Izado de tubo prefabricado de hormigón. Fuente: www.jcb.es

Para obtener un mayor alcance y poder manejar cargas voluminosas y componentes prefabricados, JCB propone la utilización de un brazo de extensión (52) provisto de un gancho giratorio. Dado que se incrementa el momento que ejerce la carga a manipular, aun ganando en alcance, la capacidad máxima que se indica para este accesorio se queda en 400 Kg.

Extension Jib

- Lattice framework provides a strong, lightweight design for maximum performance and reach
- Effective handling of bulky, suspended loads such as tanks, ducting and prefabricated components
- Supplied with swivel hook



Figura 37: Extensor grúa. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com

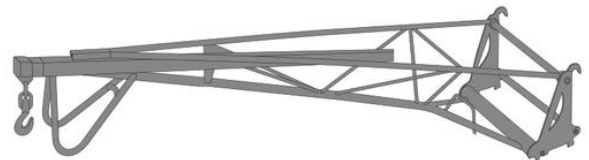


Figura 38: Implemento extensor grúa. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com



Figura 39: Empleo del extensor grúa. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com

Si por alguna circunstancia se debe trasladar una carga utilizando la máquina en movimiento, el fabricante ha diseñado un equipo de elevación para la parte delantera en dos versiones, mecánica e hidráulica. Las dos piezas triangulares de la parte anterior del equipo, junto con unos grilletes, sirven para inmovilizar la carga durante el movimiento. La versión mecánica del equipo pesa 230 Kg y la versión hidráulica, 320 Kg. La carga máxima para ambas versiones no debe sobrepasar los 300 Kg.

Vistas las opciones disponibles, se considera que esta máquina JCB debería ser equipada, al menos, con el gancho grúa anteriormente descrito.

La Unidad cuenta también con una retroexcavadora del fabricante turco Hidromek y dos retrocargadoras, modelo RC-5, de la empresa española AUSA. Estos modelos no contemplan los implementos específicos para el empleo del modo grúa. Por ello, sólo se ha considerado para este propósito el modelo de JCB, tal como se ha venido describiendo detalladamente.

IMPLEMENTOS OPCIONALES RETRO

Enganche rápido Martillo Hidráulico Ahoyador Cazo limpieza Cazo angular

Pinza Ripper Cazos Trapezoidales Diferentes medidas de cazos Características de los cazos

Ancho (mm)	Capacidad (m³)		Peso Varío (estándar) Kg	Número Cables
	Llave	Llave		
200	0,08	0,08	120,5	3
400	0,09	0,07	143,5	3
600	0,11	0,08	149,5	3
800	0,14	0,10	167	4
700	0,18	0,13	180	4
800	0,22	0,15	200,5	5
900	0,25	0,17	210,5	5

IMPLEMENTOS OPCIONALES PALA

Enganche rápido pala 4 en 1 con horquillas Pala fija 4 en 1 para enganche rápido Horquillas para enganche rápido 4 en 1 con ahoyador

Figura 40: Implementos para retroexcavadora. Fuente: JCB. (n.d.). Telescopic Handler Attachments Guide Construction & Industrial. Retrieved from www.jcb.com

F.3. Resultados de experimentación en el BZ. XII

Se ha llevado a cabo un ensayo en la Base Militar “El Goloso” (Madrid), empleando una retroexcavadora JCB 3CX, con un cazo de 0,12 m³ de masa 112 kg.



Figura 41: Tubo de hormigón. Fuente: elaboración propia

El objeto desplazado es un cilindro de hormigón armado con peldaños interiores de PVC, para uso en conducciones y drenajes de agua, de medidas 0,16 x 0,6 x 1,2 m.

Se ha estimado la masa del elemento suponiendo que se trata de un hormigón convencional HA-25 con clase de exposición IIb, con una densidad (53) de 2350 kg/m³.

El volumen total del elemento prefabricado es de 0,6269 m³, simplificando la forma del mismo equiparándola a un cilindro hueco (no se tiene en cuenta la forma irregular del borde). Por tanto, la masa total estimada del elemento es de 1473 kg.²⁰

Como elemento de amarre entre el tubo de hormigón y el cazo de la retroexcavadora, se ha empleado una cuerda dinámica de poliamida, de masa 0,054 kg/m con una fuerza de choque²¹ de 7,8 kN. El alargamiento estático de esta cuerda es del 9,2%. Sin embargo, dada la corta distancia entre los puntos de amarre sobre el tubo y el cazo de la retroexcavadora, se considera despreciable dicha elongación, por lo cual se tratará la cuerda como estática.

El ensayo consiste en el desplazamiento del elemento prefabricado hacia el interior de un pozo, de cota 5 m bajo el nivel del suelo. El elemento prefabricado parte de una posición inicial cercana al límite del pozo, girado 90° respecto de su eje vertical en la posición final deseada. Para la correcta ejecución del trabajo, es necesario elevar el elemento, desplazarlo horizontalmente hasta situarlo sobre la vertical de la posición final deseada, realizar un giro de 90° respecto del eje vertical del elemento, y colocarlo



Figura 42: Método expedito de colocación de elemento prefabricado. Fuente: elaboración propia.

²⁰ Se desprecia, a efectos de cálculo, la masa de los escalones de PVC, así como de la armadura de acero B500S interior.

²¹ La fuerza de choque corresponde al esfuerzo transmitido por una masa a una cuerda en una caída. No es representativa de los esfuerzos que realmente se generan, pues intervienen diversos factores relativos a los elementos de unión (eslingas de unión entre el tubo y la cuerda, protecciones colocadas en el cazo, etc).

con precisión sobre la superficie inferior del pozo. Para tal fin, fue necesaria la intervención de personal adicional.

En primer lugar, y tal como se ha enunciado con anterioridad, esta masa supera la carga máxima admisible de la retroexcavadora en su empleo como grúa. En segundo lugar, el resultado no fue óptimo. Si bien se logró girar la pieza, fue necesario emplear amarres adicionales para tal fin, anudados a los escalones interiores. Este esfuerzo sobre los escalones de PVC llevó a la rotura de uno de ellos. Además, al depositar el elemento prefabricado sobre el terreno, se produjo una fisura en el borde inferior, y un cierto deterioro de la superficie del mismo, debido al rozamiento con las paredes del pozo. Finalmente, y como efecto más grave, para un amarre seguro del tubo por medio de cuerdas, fue necesario realizar cuatro orificios pasantes en la pared del cilindro. Posteriormente, una vez colocado, se rellenaron con mortero de cemento. Sin embargo, en al menos uno de ellos se detectó con certeza la exposición de la armadura al realizar la perforación. Además, al llevar a cabo esta operación, la característica principal del elemento, la impermeabilidad, se ve disminuida.

En definitiva, si bien puede llevarse a cabo la tarea, esta experiencia muestra daños sobre el elemento, y puede acarrear un deterioro de la maquinaria empleada.

ANEXO G. Perfiles estructurales

Como uno de los objetivos del presente TFG, se ha propuesto el encontrar perfiles estructurales disponibles en el mercado, fabricados en materiales livianos y resistentes, como sustitución de los perfiles de acero y las vigas de madera utilizadas en la actualidad en el área de la fortificación.

A continuación se expone brevemente cada una de las opciones contempladas para este estudio.

G.1. Simulación por software para la comparación entre perfiles

A fin de obtener criterios comparativos entre los actuales perfiles de acero y vigas de madera empleadas en fortificación, y los perfiles de aluminio o PVC reforzado con fibra de vidrio, propuestos en este trabajo, se ha llevado a cabo una simulación por ordenador del comportamiento de los mismos.

La simulación realizada ha planteado la construcción de un refugio enterrado, empleando diferentes materiales, tanto los utilizados actualmente (madera y acero) como los propuestos en esta memoria (aluminio y PVC reforzado con fibra de vidrio).²²

Para este análisis, se ha tomado como caso de estudio la construcción de un refugio enterrado para personal, con un volumen total de 90 m³. Las dimensiones del mismo (9 x 4 x 2,5 m) no varían en los diferentes casos, planteados en la Tabla 14.

Se han contemplado dos casos. En primer lugar, la construcción del refugio con una estructura portante de madera y una cubierta del mismo material. En segundo lugar, se ha considerado una estructura de perfiles de acero con cubierta de madera.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Estructura portante	Viga de madera de sección cuadrangular	Perfil IPE 200 de acero S235	Perfil IPE 200 de aleación AlMgSiO
Cubierta	Viga de madera de sección cuadrangular	Viga de madera de sección cuadrangular	Viga de madera de sección cuadrangular

Tabla 13: Casos estudiados. Fuente: elaboración propia

²²http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf

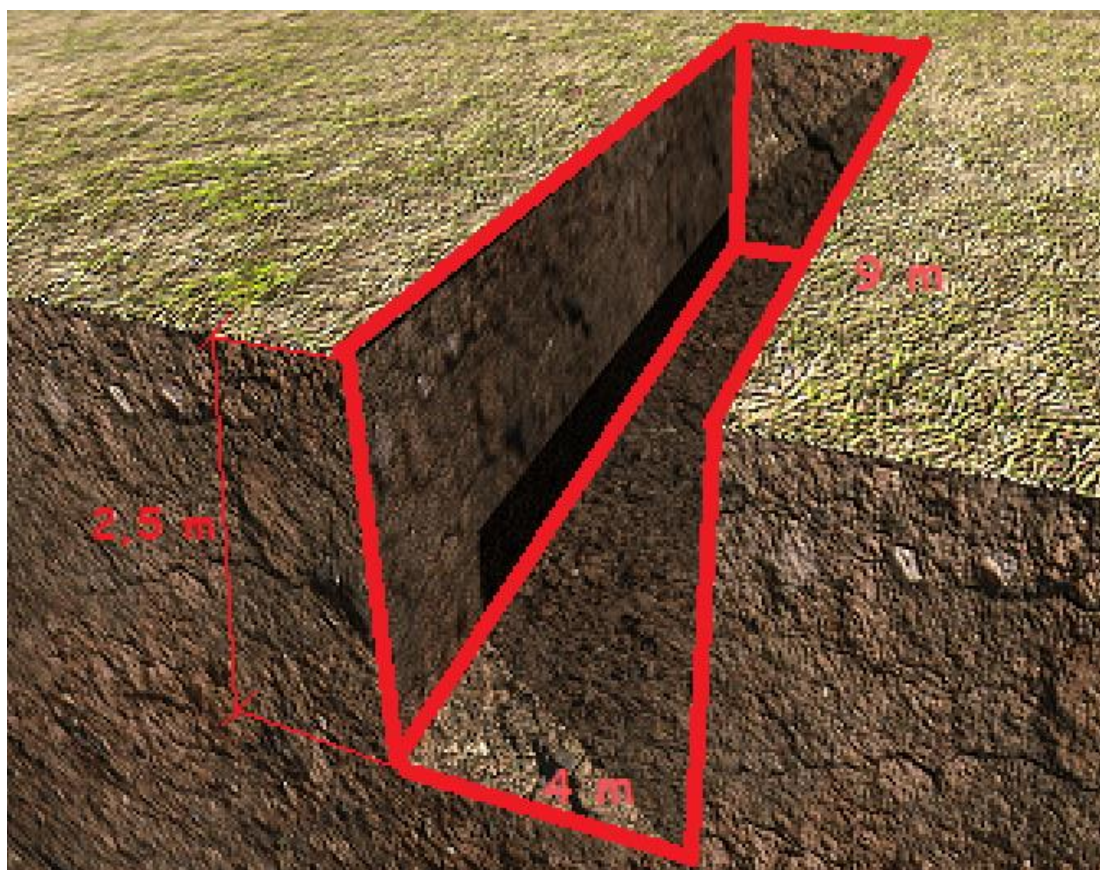


Figura 43: excavación para refugio. Fuente: elaboración propia

Las características de los materiales de los casos 1 y 2 se muestran en la Tabla 15.

	Acero S235	Madera
Módulo de elasticidad (kN/m ²)	$2,1 \times 10^8$	$1,7 \times 10^7$
Coefficiente de expansión (1/K)	$1,2 \times 10^{-5}$	6×10^{-6}
Densidad (kg/m ³)	7850	700
Fyk (t<40 mm) (MN/m ²)	235	-
Fyk (t>40 mm) (MN/m ²)	215	-
Fmk (MN/m ²)	-	60
Ftk (MN/m ²)	-	36
Fck (MN/m ²)	-	32
Módulo de cizalladura (kN/m ²)	$8,1 \times 10^7$	$1,06 \times 10^6$
Coefficiente de Poisson	0,3	0,9

Tabla 14: características del acero y la madera. Fuente: base de datos TwoDFrame

Para ambos casos, se define una altura desde el suelo del refugio a la cubierta de 2 m. Por tanto, y despreciando el ancho de la madera empleada en la cubierta, se considera una carga de tierra de 0,5 m de altura, distribuida uniformemente sobre toda la superficie del refugio. Se supone que la tierra está seca y no apisonada, con una densidad de 1550 kg/m³. (54)

$$0,5 \times 1500 = 775 \text{ kg/m}^2$$

Dado que en todos los casos de estudio se emplea una cubierta de madera, para todos ellos se modela una carga linealmente distribuida de idéntico valor, calculada a partir del lado del perfil empleado.

$$\text{Carga sobre el pórtico} = 0,2 \text{ m} \times 775 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 155 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1519 \text{ N/m}$$

G.1.1. Caso 1. Empleo de perfiles de madera

Se ha empleado viga de madera de sección cuadrada de 0,2 x 0,2 m (similar a la empleada en la obra llevada a cabo en la Base Militar “El Goloso”). Se ha modelado una estructura porticada, con dos vigas verticales y un dintel horizontal, que soportan una parte de la carga total distribuida. Se supone que las vigas empleadas como soporte estructural han sido hundidas ligeramente en el terreno. Por ese motivo, no se ha modelado dicho apoyo como un empotramiento. En caso de emplearse una zapata o similar, debe realizarse otra simulación con este supuesto. El dintel se encuentra clavado a los pilares. Por tanto, la unión entre ambos no es articulada.

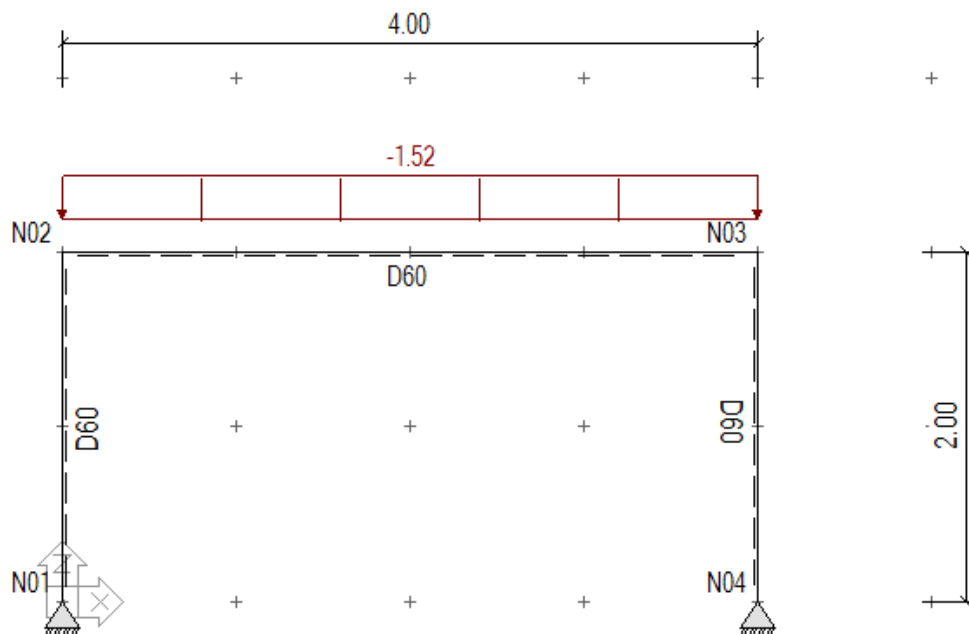


Figura 44: Caso1. Estructura de madera. Fuente: TwoDFrame

La representación gráfica de las deformaciones responde a lo esperado (ver Figura 45).

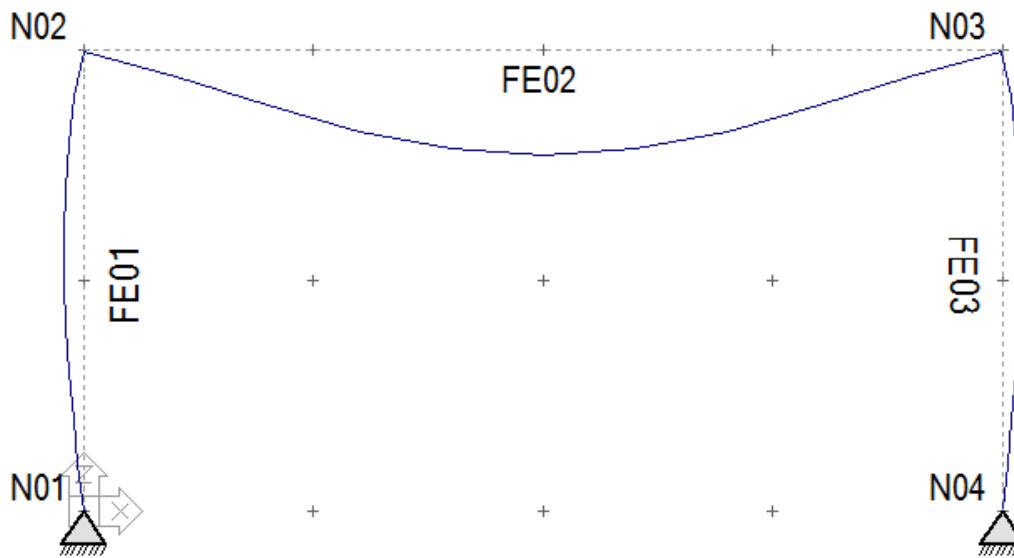


Figura 45: Caso 1. Deformada. Fuente: TwoDFrame

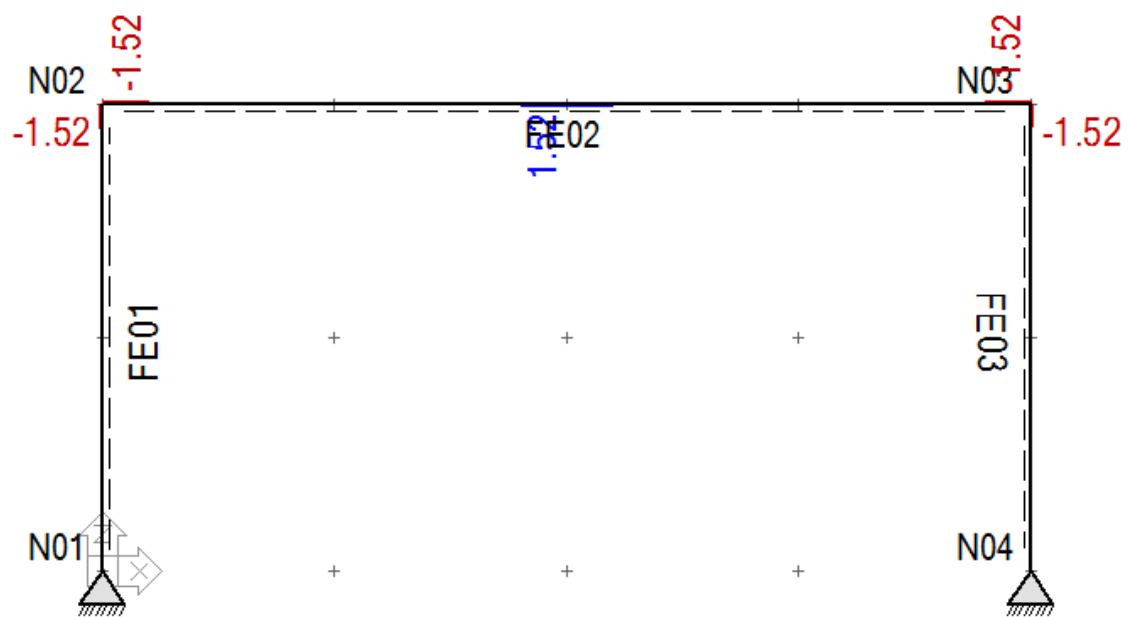


Figura 46: Caso 1. Momento flector. Fuente: TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE01 (TS 01; D60), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-3.04	-0.76	0.00	-0.08	-0.03 -1.23	0.00 0.00	-0.08 -0.31	-0.08 -0.31
0.200	-3.04	-0.76	-0.15	-0.08	-0.03 -1.23	0.11 -0.11	-0.19 -0.25	0.04 0.25
0.400	-3.04	-0.76	-0.30	-0.08	-0.03 -1.23	0.23 -0.23	-0.30 -0.49	0.15 0.49
0.600	-3.04	-0.76	-0.46	-0.08	-0.03 -1.23	0.34 -0.34	-0.42 -0.74	0.27 0.74
0.800	-3.04	-0.76	-0.61	-0.08	-0.03 -1.23	0.46 -0.46	-0.53 -0.99	0.38 0.99
1.000	-3.04	-0.76	-0.76	-0.08	-0.03 -1.23	0.57 -0.57	-0.65 -1.23	0.49 1.23
1.200	-3.04	-0.76	-0.91	-0.08	-0.03 -1.23	0.68 -0.68	-0.76 -1.48	0.61 1.48
1.400	-3.04	-0.76	-1.06	-0.08	-0.03 -1.23	0.80 -0.80	-0.87 -1.73	0.72 1.73
1.600	-3.04	-0.76	-1.21	-0.08	-0.03 -1.23	0.91 -0.91	-0.99 -1.97	0.83 1.97
1.800	-3.04	-0.76	-1.37	-0.08	-0.03 -1.23	1.02 -1.02	-1.10 -2.22	0.95 2.22
2.000	-3.04	-0.76	-1.52	-0.08	-0.03 -1.23	1.14 -1.14	-1.21 -2.47	1.06 2.47

$Y_{M0}=1.30; f_{m,d}=46.15 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; k_{cr}=0.67; f_{v,d}=3.46 \text{ MN/m}^2; f_{c,0,d}=24.62 \text{ MN/m}^2; f_{t,0,d}=27.69 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; S_d/R_d=\tau_d/(k_{cr} \cdot f_{v,d}); S_d/R_d=(\sigma_{c,0,d} \cdot f_{c,0,d})^2 + \sigma_{m,d}/(k_h \cdot f_{m,d})$

Figura 47: Caso 1. Reacciones y momentos sobre el pilar. Fuente: TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE02 (TS 01; D60), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-0.76	3.04	-1.52	-0.02	0.11 4.91	1.14 -1.14	-1.16 -2.47	1.12 2.47
0.400	-0.76	2.43	-0.42	-0.02	0.09 3.93	0.32 -0.32	-0.34 -0.69	0.30 0.69
0.800	-0.76	1.82	0.43	-0.02	0.07 2.95	-0.32 0.32	0.30 0.69	-0.34 -0.69
1.200	-0.76	1.22	1.03	-0.02	0.05 1.96	-0.78 0.78	0.76 1.68	-0.79 -1.68
1.600	-0.76	0.61	1.40	-0.02	0.02 0.98	-1.05 1.05	1.03 2.27	-1.07 -2.27
2.000	-0.76	0.00	1.52	-0.02	0.00 -0.00	-1.14 1.14	1.12 2.47	-1.16 -2.47
2.400	-0.76	-0.61	1.40	-0.02	-0.02 -0.98	-1.05 1.05	1.03 2.27	-1.07 -2.27
2.800	-0.76	-1.22	1.03	-0.02	-0.05 -1.96	-0.78 0.78	0.76 1.68	-0.79 -1.68
3.200	-0.76	-1.82	0.43	-0.02	-0.07 -2.95	-0.32 0.32	0.30 0.69	-0.34 -0.69
3.600	-0.76	-2.43	-0.42	-0.02	-0.09 -3.93	0.32 -0.32	-0.34 -0.69	0.30 0.69
4.000	-0.76	-3.04	-1.52	-0.02	-0.11 -4.91	1.14 -1.14	-1.16 -2.47	1.12 2.47

$Y_{M0}=1.30; f_{m,d}=46.15 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; k_{cr}=0.67; f_{v,d}=3.46 \text{ MN/m}^2; f_{c,0,d}=24.62 \text{ MN/m}^2; f_{t,0,d}=27.69 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; S_d/R_d=\tau_d/(k_{cr} \cdot f_{v,d}); S_d/R_d=(\sigma_{c,0,d} \cdot f_{c,0,d})^2 + \sigma_{m,d}/(k_h \cdot f_{m,d})$

Figura 48: Caso 1. Reacciones y momentos sobre el dintel. Fuente: TwoDFrame

Element Displacements, Element: FE01 (TS 01: D60), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φyy
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22
0.200	-0.04	-0.00	-0.00	0.04	0.22
0.400	-0.09	-0.00	-0.00	0.09	0.20
0.600	-0.12	-0.00	-0.00	0.12	0.16
0.800	-0.15	-0.00	-0.00	0.15	0.11
1.000	-0.17	-0.00	-0.00	0.17	0.05
1.200	-0.17	-0.01	-0.01	0.17	-0.02
1.400	-0.16	-0.01	-0.01	0.16	-0.11
1.600	-0.13	-0.01	-0.01	0.13	-0.21
1.800	-0.07	-0.01	-0.01	0.07	-0.32
2.000	0.00	-0.01	-0.01	-0.00	-0.45

Element Displacements, Element: FE02 (TS 01: D60), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φyy
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.45
0.400	0.00	-0.23	0.00	-0.23	-0.62
0.800	0.00	-0.48	0.00	-0.48	-0.61
1.200	0.00	-0.70	0.00	-0.70	-0.48
1.600	0.00	-0.85	0.00	-0.85	-0.26
2.000	0.00	-0.90	0.00	-0.90	0.00
2.400	-0.00	-0.85	-0.00	-0.85	0.26
2.800	-0.00	-0.70	-0.00	-0.70	0.48
3.200	-0.00	-0.48	-0.00	-0.48	0.61
3.600	-0.00	-0.23	-0.00	-0.23	0.62
4.000	-0.00	-0.01	-0.00	-0.01	0.45

Figura 49: Caso 1. Desplazamientos. Fuente: TwoDFrame

G.1.2. Caso 2. Empleo combinado de acero y madera

Se ha modelado la misma estructura que en el caso anterior, reemplazando los pilares de madera por perfiles IPE 200 de acero S235. La unión entre los mismos y el dintel de madera se considera no articulada.

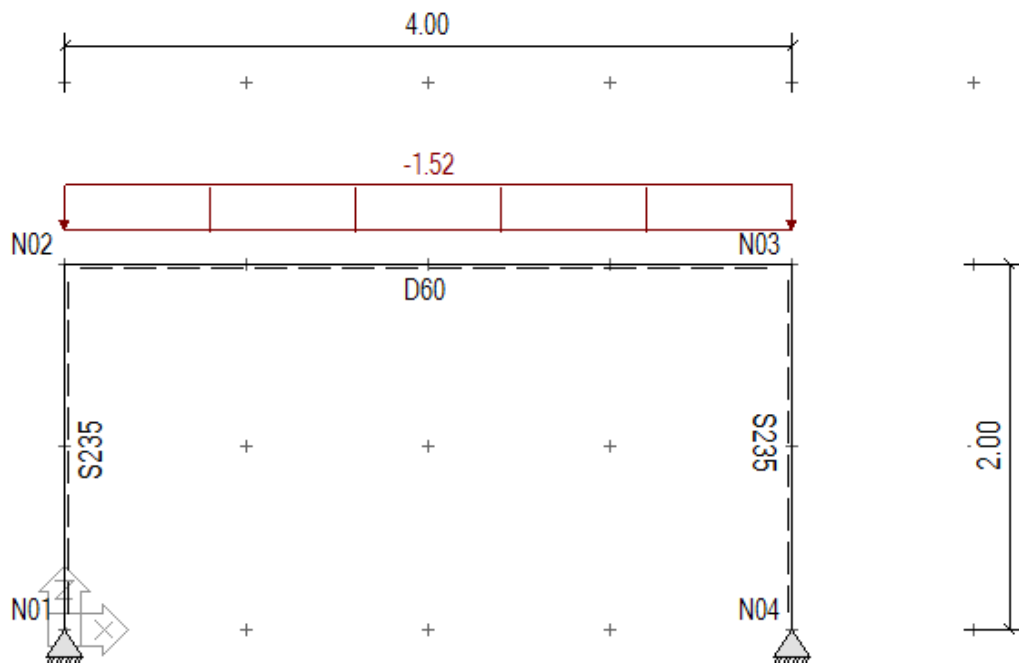


Figura 50: Caso 2. Fuente: TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE01 (IPE 200; S235), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-3.04	-0.85	0.00	-1.07	-0.87 -0.64	0.00 0.00	-1.07 -0.45	-1.07 -0.45
0.200	-3.04	-0.85	-0.17	-1.07	-0.87 -0.64	0.88 -0.88	-1.95 -0.83	-0.19 -0.08
0.400	-3.04	-0.85	-0.34	-1.07	-0.87 -0.64	1.76 -1.76	-2.82 -1.20	0.69 0.29
0.600	-3.04	-0.85	-0.51	-1.07	-0.87 -0.64	2.64 -2.64	-3.70 -1.58	1.57 0.67
0.800	-3.04	-0.85	-0.68	-1.07	-0.87 -0.64	3.52 -3.52	-4.58 -1.95	2.45 1.04
1.000	-3.04	-0.85	-0.85	-1.07	-0.87 -0.64	4.39 -4.39	-5.46 -2.32	3.33 1.42
1.200	-3.04	-0.85	-1.02	-1.07	-0.87 -0.64	5.27 -5.27	-6.34 -2.70	4.21 1.79
1.400	-3.04	-0.85	-1.20	-1.07	-0.87 -0.64	6.15 -6.15	-7.22 -3.07	5.09 2.16
1.600	-3.04	-0.85	-1.37	-1.07	-0.87 -0.64	7.03 -7.03	-8.10 -3.45	5.96 2.54
1.800	-3.04	-0.85	-1.54	-1.07	-0.87 -0.64	7.91 -7.91	-8.98 -3.82	6.84 2.91
2.000	-3.04	-0.85	-1.71	-1.07	-0.87 -0.64	8.79 -8.79	-9.85 -4.19	7.72 3.29

$Y_{M0}=1.00; f_{y,d}=235.00 \text{ MN/m}^2; f_{v,d}=135.68 \text{ MN/m}^2; S_d/R_d=\tau_d/f_{v,d}; S_d/R_d=\sigma_d/f_{y,d}; \sigma_v=\sqrt{(\sigma_x^2+3\tau^2)}$

Figura 51. Caso 2. Reacciones y momentos sobre el pilar. Fuente: TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE02 (TS 01; D60), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-0.85	3.04	-1.71	-0.02	0.11 4.91	1.28 -1.28	-1.30 -2.78	1.26 2.77
0.400	-0.85	2.43	-0.61	-0.02	0.09 3.93	0.46 -0.46	-0.48 -1.00	0.44 1.00
0.800	-0.85	1.82	0.24	-0.02	0.07 2.95	-0.18 0.18	0.16 0.38	-0.20 -0.38
1.200	-0.85	1.22	0.84	-0.02	0.05 1.96	-0.63 0.63	0.61 1.37	-0.65 -1.37
1.600	-0.85	0.61	1.21	-0.02	0.02 0.98	-0.91 0.91	0.89 1.96	-0.93 -1.96
2.000	-0.85	0.00	1.33	-0.02	0.00 -0.00	-1.00 1.00	0.98 2.16	-1.02 -2.16
2.400	-0.85	-0.61	1.21	-0.02	-0.02 -0.98	-0.91 0.91	0.89 1.96	-0.93 -1.96
2.800	-0.85	-1.22	0.84	-0.02	-0.05 -1.96	-0.63 0.63	0.61 1.37	-0.65 -1.37
3.200	-0.85	-1.82	0.24	-0.02	-0.07 -2.95	-0.18 0.18	0.16 0.38	-0.20 -0.38
3.600	-0.85	-2.43	-0.61	-0.02	-0.09 -3.93	0.46 -0.46	-0.48 -1.00	0.44 1.00
4.000	-0.85	-3.04	-1.71	-0.02	-0.11 -4.91	1.28 -1.28	-1.30 -2.78	1.26 2.77

$Y_{M0}=1.30; f_{m,d}=46.15 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; k_{cr}=0.67; f_{v,d}=3.46 \text{ MN/m}^2; f_{c,0,d}=24.62 \text{ MN/m}^2; f_{t,0,d}=27.69 \text{ MN/m}^2; k_h=1.000; S_d/R_d=\tau_d/(k_{cr}f_{v,d}); S_d/R_d=(\sigma_{c,0,d}f_{c,0,d})^2+\sigma_{m,d}/(k_hf_{m,d})$

Figura 52. Caso 2. Reacciones y momentos sobre el dintel. Fuente: TwoDFrame

Element Displacements, Element: FE01 (IPE 200: S235), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φ_{yy}
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
0.200	-0.03	-0.00	-0.00	0.03	0.13
0.400	-0.05	-0.00	-0.00	0.05	0.12
0.600	-0.08	-0.00	-0.00	0.08	0.10
0.800	-0.09	-0.00	-0.00	0.09	0.07
1.000	-0.10	-0.01	-0.01	0.10	0.03
1.200	-0.11	-0.01	-0.01	0.11	-0.01
1.400	-0.10	-0.01	-0.01	0.10	-0.07
1.600	-0.08	-0.01	-0.01	0.08	-0.13
1.800	-0.05	-0.01	-0.01	0.05	-0.20
2.000	0.00	-0.01	-0.01	-0.00	-0.28

Element Displacements, Element: FE02 (TS 01: D60), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φ_{yy}
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.28
0.400	0.00	-0.17	0.00	-0.17	-0.48
0.800	0.00	-0.37	0.00	-0.37	-0.51
1.200	0.00	-0.56	0.00	-0.56	-0.41
1.600	0.00	-0.69	0.00	-0.69	-0.23
2.000	0.00	-0.74	0.00	-0.74	0.00
2.400	-0.00	-0.69	-0.00	-0.69	0.23
2.800	-0.00	-0.56	-0.00	-0.56	0.41
3.200	-0.00	-0.37	-0.00	-0.37	0.51
3.600	-0.00	-0.17	-0.00	-0.17	0.48
4.000	-0.00	-0.01	-0.00	-0.01	0.28

Figura 53: Caso 2. Desplazamientos. Fuente: TwoDFrame

G.1.3. Caso 3. Empleo de perfiles de aluminio y dintel de madera

Como alternativa a los materiales empleados en los casos anteriores, se propone el empleo de perfiles de aleación de aluminio AlMgSi0, con dimensiones comerciales, en sustitución de los pilares de acero. Dichos pilares se han modelado mediante perfiles IPE 200 de la aleación mencionada, la cual presenta las siguientes características mecánicas (Tabla 16).

Módulo de elasticidad (kN/m ²)	7×10^7
Coefficiente de expansión (1/K)	$2,4 \times 10^{-5}$
Densidad (kg/m ³)	2800
Módulo de cizalladura (kN/m ²)	3×10^7
Coefficiente de Poisson	0,3

Tabla 15: Características mecánicas AlMgSi0. Fuente: Base de datos de TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE01 (IPE 200; AlMgSi0), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-3.04	-0.65	0.00	-1.07	-0.66 -1.20	0.00 0.00	-1.07 -1.12	-1.07 -1.12
0.200	-3.04	-0.65	-0.13	-1.07	-0.66 -1.20	0.67 -0.67	-1.74 -1.83	-0.40 -0.42
0.400	-3.04	-0.65	-0.26	-1.07	-0.66 -1.20	1.34 -1.34	-2.41 -2.53	0.27 0.40
0.600	-3.04	-0.65	-0.39	-1.07	-0.66 -1.20	2.01 -2.01	-3.08 -3.24	0.94 1.38
0.800	-3.04	-0.65	-0.52	-1.07	-0.66 -1.20	2.68 -2.68	-3.75 -3.94	1.61 2.36
1.000	-3.04	-0.65	-0.65	-1.07	-0.66 -1.20	3.35 -3.35	-4.42 -4.65	2.28 3.34
1.200	-3.04	-0.65	-0.78	-1.07	-0.66 -1.20	4.02 -4.02	-5.08 -5.35	2.95 4.32
1.400	-3.04	-0.65	-0.91	-1.07	-0.66 -1.20	4.69 -4.69	-5.75 -6.06	3.62 5.29
1.600	-3.04	-0.65	-1.04	-1.07	-0.66 -1.20	5.36 -5.36	-6.42 -6.76	4.29 6.27
1.800	-3.04	-0.65	-1.17	-1.07	-0.66 -1.20	6.03 -6.03	-7.09 -7.47	4.96 7.25
2.000	-3.04	-0.65	-1.30	-1.07	-0.66 -1.20	6.70 -6.70	-7.76 -8.17	5.63 8.23

Figura 54. Caso 3. Esfuerzos en el pilar. Fuente: TwoDFrame

Internal Forces and Moments, Element: FE02 (TS 01; D60), Load Case: LC01								
Distance from Start Node	Axial Force N_x	Shear Force V_z	Bending Moment M_{yy}	Normal Stress σ_{Nx}	Shear Stress τ_{Vz} S_d/R_d	Bending Stress Top Bot σ_{Myy}	Normal+Bending Bot $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d	Normal+Bending Top $\sigma_{Nx}+\sigma_{Myy}$ S_d/R_d
[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [N/mm ²]	[N/mm ²] [%]	[N/mm ²] [%]
0.000	-0.65	3.04	-1.30	-0.02	0.11 4.91	0.98 -0.98	-0.99 -2.11	0.96 2.11
0.400	-0.65	2.43	-0.21	-0.02	0.09 3.93	0.16 -0.16	-0.17 -0.34	0.14 0.34
0.800	-0.65	1.82	0.64	-0.02	0.07 2.95	-0.48 0.48	0.47 1.04	-0.50 -1.04
1.200	-0.65	1.22	1.25	-0.02	0.05 1.96	-0.94 0.94	0.92 2.03	-0.95 -2.03
1.600	-0.65	0.61	1.62	-0.02	0.02 0.98	-1.21 1.21	1.20 2.62	-1.23 -2.62
2.000	-0.65	0.00	1.74	-0.02	0.00 0.00	-1.30 1.30	1.29 2.82	-1.32 -2.82
2.400	-0.65	-0.61	1.62	-0.02	-0.02 -0.98	-1.21 1.21	1.20 2.62	-1.23 -2.62
2.800	-0.65	-1.22	1.25	-0.02	-0.05 -1.96	-0.94 0.94	0.92 2.03	-0.95 -2.03
3.200	-0.65	-1.82	0.64	-0.02	-0.07 -2.95	-0.48 0.48	0.47 1.04	-0.50 -1.04
3.600	-0.65	-2.43	-0.21	-0.02	-0.09 -3.93	0.16 -0.16	-0.17 -0.34	0.14 0.34
4.000	-0.65	-3.04	-1.30	-0.02	-0.11 -4.91	0.98 -0.98	-0.99 -2.11	0.96 2.11

Figura 55: Caso 3. Esfuerzos en el dintel. Fuente: TwoDFrame

Element Displacements, Element: FE01 (IPE 200; AlMgSiO), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φ yy
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
0.200	-0.06	-0.00	-0.00	0.06	0.31
0.400	-0.12	-0.01	-0.01	0.12	0.28
0.600	-0.17	-0.01	-0.01	0.17	0.23
0.800	-0.21	-0.01	-0.01	0.21	0.16
1.000	-0.24	-0.02	-0.02	0.24	0.08
1.200	-0.24	-0.02	-0.02	0.24	-0.03
1.400	-0.23	-0.02	-0.02	0.23	-0.15
1.600	-0.18	-0.02	-0.02	0.18	-0.29
1.800	-0.11	-0.03	-0.03	0.11	-0.46
2.000	0.00	-0.03	-0.03	-0.00	-0.64

Element Displacements, Element: FE02 (TS 01; D60), Load Case: LC01					
Distance from Start Node	global dx	global dz	local dx	local dz	φ yy
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mrad]
0.000	0.00	-0.03	0.00	-0.03	-0.64
0.400	0.00	-0.32	0.00	-0.32	-0.77
0.800	0.00	-0.62	0.00	-0.62	-0.73
1.200	0.00	-0.88	0.00	-0.88	-0.56
1.600	0.00	-1.06	0.00	-1.06	-0.30
2.000	0.00	-1.12	0.00	-1.12	0.00
2.400	-0.00	-1.06	-0.00	-1.06	0.30
2.800	-0.00	-0.88	-0.00	-0.88	0.56
3.200	-0.00	-0.62	-0.00	-0.62	0.73
3.600	-0.00	-0.32	-0.00	-0.32	0.77
4.000	-0.00	-0.03	-0.00	-0.03	0.64

Figura 56: Caso 3. Desplazamientos. Fuente: TwoDFrame

G.1.4. Análisis de los resultados obtenidos

I. Comparación del momento flector

Se ha calculado el momento flector máximo en cada una de las vigas. Para este fin, se ha evaluado en el punto medio del dintel, pues debido a la configuración de las estructuras estudiadas, es donde se espera un valor máximo del mismo. Asimismo, se ha evaluado en el nodo de unión entre pilar y dintel. Debido a la simetría de los pórticos analizados, solo se somete a estudio uno de los dos pilares.

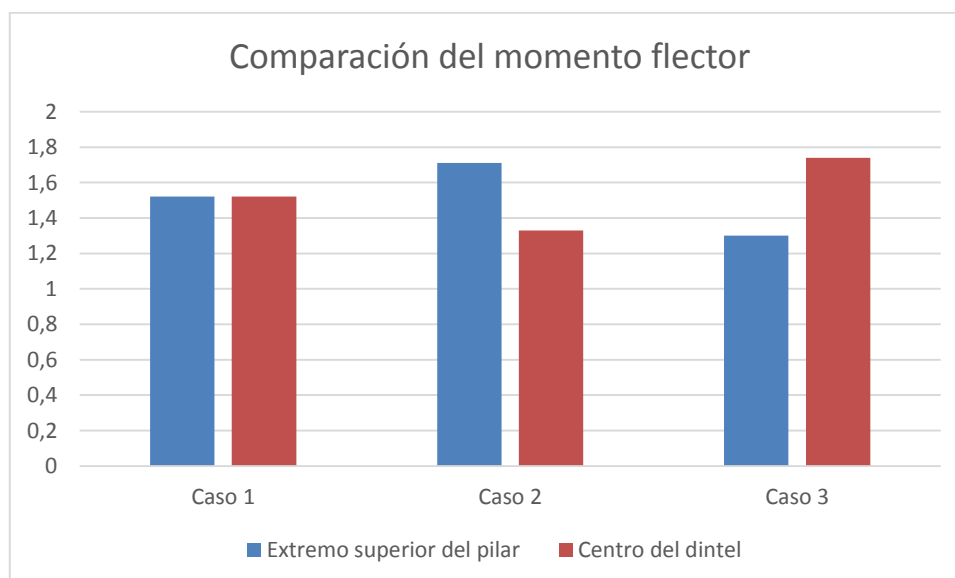


Figura 57: Comparación de momentos flectores. Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran que el momento flector en el centro del dintel es máximo en caso de emplear perfiles de aluminio. Sin embargo, es mínimo en el nexo de unión entre el dintel y el pilar. Se atribuye dicho efecto a la elevada deformación que sufre el aluminio (Tabla 17) que provoca una elevada flexión sobre el dintel, pero una transmisión de la misma reducida hacia los nexos de unión con los pilares. Debido a este efecto, debe dimensionarse los dinteles conociendo dicho incremento en el momento flector, especialmente en caso de emplearse para grandes luces.

II. Comparación de deformaciones

Se puede apreciar una deformación claramente superior cuando se emplean perfiles de aluminio. La Tabla 17 refleja dicha diferencia.

	Desp. pilar	Desp. dintel		Desp. pilar	Desp. dintel
Caso 1	0,01 mm	0,85 mm	Caso 2	0 mm	0,74 mm
Caso 3	0,03 mm	1,12 mm	Caso 3	0,03 mm	1,12 mm

Tabla 16: Comparación de deformaciones. Fuente: elaboración propia

La simulación muestra una superior deformación de los perfiles de aluminio respecto del resto de opciones. Si bien puede suponer un problema a priori en determinadas situaciones, el superior límite de fluencia del aluminio evita que se llegue al régimen plástico.

III. Comparación de masas totales

La principal ventaja del empleo de aluminio frente al acero es su inferior densidad, lo que facilita la manipulación de los elementos, debido a su menor masa. Los pórticos sometidos a estudio tienen una masa total reflejada en la Tabla 18. La Tabla 17 muestra la diferencia de masas entre las diferentes opciones analizadas.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
224 kg	200,44 kg	143,9 kg

Tabla 18: Masa de cada estructura. Fuente: TwoDFrame

	Caso 1	Caso2
Caso 2	23,56 kg	-
Caso 3	80,1 kg	56,54 kg

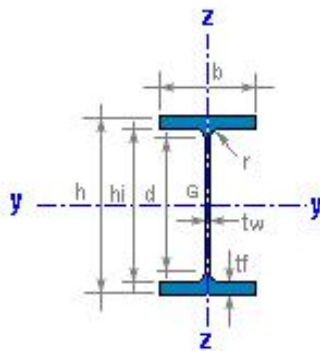
Tabla 17: Diferencias de masa. Fuente: TwoDFrame

G.2. Perfiles de aluminio

Se trata de un metal no ferromagnético y muy abundante en la corteza terrestre, que se extrae del mineral conocido como bauxita a través de procesos industriales. Sus propiedades hacen que sea un material con amplias aplicaciones en el campo de la ingeniería, por ejemplo, su baja densidad (2700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Además, es muy sencillo de mecanizar y relativamente barato. (55)

Presenta enormes ventajas frente al acero, tradicionalmente empleado en las obras de fortificación militar. La densidad del aluminio es aproximadamente un tercio de la del acero, 7830 kg/m³. Dado que en el ámbito de la fortificación militar es habitual trabajar sin medios mecánicos de transporte de material, o con limitaciones en el uso de los mismos, es fundamental que los elementos constructivos sean manejables. A modo de ejemplo, en la construcción del Puesto de Mando enterrado de la Base Militar “El Goloso” se han empleado perfiles IPE-200 de acero, como el descrito en la figura:

IPE 200



$h = 200 \text{ mm}$	$r = 12 \text{ mm}$
$b = 100 \text{ mm}$	$d = 159.0 \text{ mm}$
$tw = 5.6 \text{ mm}$	$hi = 183.0 \text{ mm}$
$tf = 8.5 \text{ mm}$	

$A = 28.5 \text{ cm}^2$	$M = 22.4 \text{ kg/m}$
-------------------------	-------------------------

$I_y = 1943 \text{ cm}^4$	$I_z = 142 \text{ cm}^4$
$W_y = 194.3 \text{ cm}^3$	$W_z = 28.5 \text{ cm}^3$
$W_{ply} = 220.7 \text{ cm}^3$	$W_{plz} = 44.6 \text{ cm}^3$
$i_y = 8.26 \text{ cm}$	$i_z = 2.24 \text{ cm}$
$I_t = 6.9 \text{ cm}^4$	$I_w = 13052 \text{ cm}^6$

$S_y = 110.3 \text{ cm}^3$	$Avz = 14.00 \text{ cm}^2$
$s_y = 17.6 \text{ cm}$	

$AL = 0.768 \text{ m}^2/\text{m}$	$AG = 34.35 \text{ m}^2/\text{t}$
-----------------------------------	-----------------------------------

Figura 58: Perfil IPE 200. Fuente: Norma UNE 36526:1994

De acuerdo con los datos de la norma UNE 36526:1994-Productos de Acero Laminados en Caliente, donde se expresan las masas lineales de los perfiles IPE, al igual que sus medidas, este tipo de perfil estructural de acero tiene una masa de 22,4 kg/m. Se han empleado un total de cuatro perfiles electrosoldados, con una longitud de dos metros cada uno, dando como resultado una estructura de 179,2 kg. Dada su masa, es necesario un número de trabajadores elevado para su transporte, siendo reducido en caso de emplearse aluminio.

Si bien la resistencia mecánica del aluminio es menor que la del acero, las obras de fortificación realizadas por las Unidades de Zapadores no se caracterizan por soportar elevadas cargas de uso. Por razón de dicha característica, serán infrecuentes los casos en los cuales los perfiles de aluminio no puedan reemplazar a sus homólogos de acero por no soportar los esfuerzos aplicados sobre ellos. En la Tabla 19 puede apreciarse las diferencias en las características mecánicas y físicas de ambos materiales.

Características Físicas y Mecánicas	Perfiles Laminados Acero (A37, A42, A52)	Aluminio
Peso Específico (gr/cm^3)	7,85	2,70
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1535	658
Coefficiente de Dilatación Térmica Lineal ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	11	23
Resistividad Eléctrica ($\text{microhmios-cm}^2/\text{cm}$)	19	2,8
Resistencia a Tracción (N/mm^2)	370-620	250-300
Límite Elástico 0,2 (N/mm^2)	240-360	270
Módulo de Elasticidad (N/mm^2)	200.000	65.000

Tabla 19: Comparativa entre acero y aluminio. Fuente: Gustavo Maffia, E. (2013). Estructura y Propiedades del Aluminio y sus aleaciones. Buenos Aires: Universidad de la Plata.

Entre las desventajas del aluminio con respecto al acero, destaca su elevado coeficiente de dilatación térmica lineal, de $23 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, duplicando al del acero ($11 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Además de esto, hallamos el inconveniente de que el método más habitual para unir vigas metálicas en este tipo de trabajos es la electrosoldadura. De hecho, los zapadores disponen en su dotación de equipos de soldadura de este tipo. Sin embargo, la resistencia que opone el aluminio al paso de la corriente es unas 5 veces inferior a la que opone el acero. Esta circunstancia condiciona el proceso de soldadura por puntos de resistencia, pues el calor necesario para llevar las chapas o vigas a estado pastoso para unir las depende directamente de la resistencia al paso de la corriente que éstas opongan. Los equipos de soldadura empleados normalmente en reparación se hallan muy limitados para este tipo de soldadura en aluminio, pues no permiten alcanzar intensidades tan altas como las que serían necesarias para contrarrestar su baja resistencia.

En definitiva, para realizar una soldadura por puntos es necesario el empleo de equipos de electrosoldadura de alta intensidad, de los cuales carecen la mayor parte de las Unidades. La solución planteada es el empleo de otro tipo de soldadura. Entre los métodos más comunes para soldar aluminio se halla el soldador TIG (*Tungsten Inert Gas*). Este tipo de soldador utiliza electrodos de tungsteno y gas inerte para proteger la zona de soldadura, y su uso se encuentra generalizado, por lo cual existe una amplia variedad de equipos de soldadura TIG disponibles en el mercado.

G.3. Perfiles de PVC reforzado con fibra de vidrio

En los últimos años, los avances en el área de los materiales compuestos han hecho posible la comercialización de perfiles estructurales fabricados en diferentes tipos de resinas, fibra de vidrio, fibra de carbono y plásticos, o de una combinación de todos ellos. Para este trabajo se ha planteado como opción de sustitución de los perfiles de madera y acero los perfiles comerciales de PVC reforzados con fibra de vidrio.

Dentro de la categoría de Plásticos Reforzados con Fibras (PRF) se localizan todos aquellos materiales compuestos por dos elementos: una matriz resinosa (en este caso, PVC) y un agente de refuerzo, como son las fibras o tejidos de vidrio o carbono.

Presentan múltiples ventajas frente a los materiales actualmente en uso. Tal y como afirma Minguzzi (2009), la principal de ellas es su baja masa, lo cual hace posible una manipulación más sencilla. A modo de ejemplo, el PVC comercial tiene una densidad del orden de 1400 kg/m³, mientras que el acero, tal y como se ha mencionado con anterioridad, presenta una densidad de 7830 kg/m³. Es decir, nos encontramos ante un material que es alrededor de un 80% menos pesado que su homólogo para un mismo volumen. (56)

Los perfiles de PVC reforzados con fibra de vidrio considerados se comercializan bajo la marca Dynaform®, de la casa FiberGrate, en multitud de formatos. Sus características mecánicas principales son las siguientes.

Módulo de elasticidad (kN/m ²)	1,93 × 10 ⁷
Coeficiente de expansión (1/K)	-
Densidad (kg/m ³)	1716,154092
Módulo de cizalladura (kN/m ²)	3 × 10 ⁷
Coeficiente de Poisson	0,3

Tabla 20: Características mecánicas perfiles Dynaform. Fuente: http://www.fibergrate.com/media/38293/dynaform_structural_shapes_brochure_es_0913.pdf

Sus características mecánicas, tanto si se considera una relación masa-resistencia como si se comparan por separado, superan ampliamente a las de su competidor. El siguiente cuadro muestra sus principales propiedades, comparadas con un acero de uso común, y con el aluminio, estudiado con anterioridad.

CARACTERÍSTICAS		FRP	Steel St-52	Aluminium
Peso específico	(kg/dm ³)	1.9	7.8	2.7
Res. a tracción	(N/mm ²)	1'000	600	350
Módulo de elasticidad	(N/mm ²)	44'000	207'000	69'000

Tabla 21: Comparativa entre FRP, acero y aluminio, Fuente: Fibergate Composite Structures. (2013). Catálogo de Perfiles Estructurales Dynaform.

Como ventajas adicionales, y dada su naturaleza no metálica, los perfiles de PVC reforzado no se oxidan, lo cual reduce su mantenimiento. Además, su conductividad eléctrica es inferior a la del acero o el aluminio. Ello es una ventaja, pues a menudo los Puestos de Mando o asentamientos enterrados, en caso de ser perfeccionados o establecidos con carácter de permanencia, contarán con instalación eléctrica, con lo cual se incrementa la seguridad. (57)

Otra de sus grandes ventajas, relativa a su inflamabilidad, es que el PVC es un material autoextinguible, según la norma UNE 53.315. Así, se trata de un material clasificado como M1, que corresponde a un material no inflamable o difícilmente inflamable. El PVC solo sigue

ardiendo si se mantiene una llama aplicada en él; al retirarle la llama se extingue inmediatamente. En caso de producirse una combustión, libera ácido clorhídrico (HCl) en forma de gas, que produce la irritación de la mucosa de la nariz, boca y ojos. Ello constituye una ventaja si se considera que una combustión puede detectarse de forma precoz a través del olfato.

ANEXO H. Investigación y uso de prefabricados en fortificación por otros Ejércitos

En este Trabajo de Fin de Grado, además de proponer tecnologías concretas, existentes en la actualidad, para su aplicación por las FAS, busca plantear una serie de líneas futuras de investigación. Para ello, en el presente Anexo se citan los principales centros de investigación sobre la materia, de los países que más I+D+i llevan a cabo. El objetivo es mantener sobre ellos una vigilancia tecnológica, a fin de estar al día de la aparición de nuevos productos, técnicas o tecnologías. Igualmente, se describen algunos de sus proyectos, que considero de alto interés para el Ejército de Tierra.

H.1. Estados Unidos

La doctrina del ejército estadounidense considera incluidos en la fortificación de campaña todos aquellos elementos, naturales o artificiales, que aportan protección y pueden ser empleados como refugios para el personal y las armas, como obstáculos defensivos y como posiciones de fuego protegidas (58).

En este país, el desarrollo de elementos prefabricados para fortificación se beneficia en gran medida de los trabajos de unas instalaciones conocidas como *Waterways Experiment Station* (WES), situadas en Vicksburg, en el estado de Misisipi. Se trata de las principales instalaciones para la investigación de las que dispone el *Army Corps of Engineers*. En su campus se localiza el llamado ERDC (*Engineers Research and Development Center*). El ERDC es el mayor de los cuatro laboratorios de investigación y desarrollo al servicio del cuerpo de ingenieros. Actúa como cuartel general de estos cuatro laboratorios y de varios centros de ensayo y experimentación. También realiza trabajos de interés para la sociedad civil.

En el ámbito de nuestro trabajo, resultan de especial interés las tareas que realizan los laboratorios de Geotecnia y Estructuras y de Investigación para la Ingeniería de Construcción: *Geotechnical and Structures Lab* (GSL), *Construction Engineering Research Lab* (CERL).

H.1.1. Barreras de protección modulares

Un campo de investigación de estos laboratorios que debemos resaltar es el relacionado con el desarrollo de barreras ligeras contra proyectiles, explosiones y fragmentos, de bajo coste y aplicables a zonas grandes. Dichas barreras se basan en paneles que puedan ser

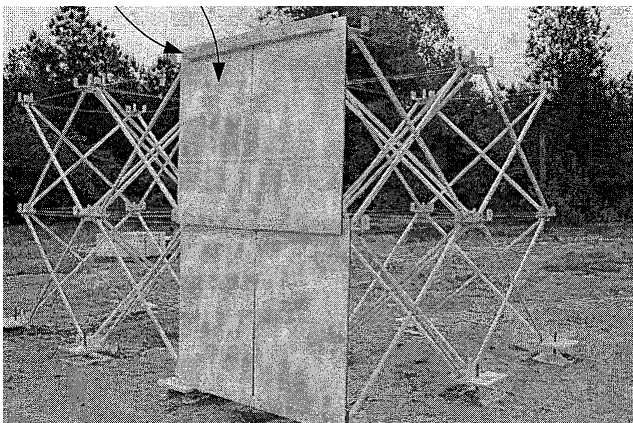


Figura 59: Barrera modular estadounidense. Fuente: ERDC

colocados en soportes robustos. Tanto las secciones modulares de los soportes, como los paneles han de ser lo suficientemente ligeros para ser transportados por un solo hombre.

Esta actividad ha dado lugar patentes como la relativa a una estructura protectora basada en elementos portables. Un módulo, semejante a una caja sin paredes, sostiene los paneles sobre un lado de la estructura. Los

módulos se pueden interconectar para construir una barrera protectora como, por ejemplo, un muro. La interconexión es tanto horizontal, como vertical, para hacer posible aumentar la altura de la barrera. (59)

H.1.2. Hormigones de alta resistencia

Resultan igualmente de interés las patentes del ERDC relativas a hormigones de alta resistencia, conocidos como UHPC (*Ultra High Performance Concrete*). Se consideran UHPC aquellos hormigones con una resistencia a la compresión mayor de 150 MPa, y que contienen altas proporciones de aglutinantes, con un ratio de de agua/cemento muy bajo y alto contenido de reductores de agua. En los últimos años, se les suele añadir un refuerzo interno a base de fibras (23).

Los hormigones UHPC fueron desarrollados por la industria civil dando lugar a productos comerciales como el Ductal[®], fabricado actualmente de forma principal por la empresa franco-suiza *LafargeHolcim*. Estos hormigones están siendo mejorados por las investigaciones del ERDC para aumentar su capacidad de absorber energía ante una explosión y su resistencia balística. El Laboratorio de Geotecnia y Estructuras ha desarrollado, probado y patentado una familia de fórmulas de UHPC a la que ha denominado "Cor-Tuf", y sobre la que continúa realizando modificaciones y ensayos.

La fórmula inicial está compuesta por cemento (finura de 280-360 m²/kg), arena en una relación de masa de 0,75 a 1,25, humo de sílice en una proporción en masa de 0,15 a 0,4, harina de sílice en una proporción en masa de 0,15 a 0,3 del cemento, y micro-inclusiones en una relación de masa de hasta 0,35 del cemento; una mezcla de segundos constituyentes que comprende una cantidad especificada de HRWRA (*High-Range Water-Reducing Admixture*, un tipo de aditivo súper-plastificante) y una cantidad de agua en una proporción en masa del cemento de 0,2 hasta 0,35; a la pasta de cemento resultante, se añade una cantidad de macro-fibras en una relación en masa de hasta el 0,35 del cemento para producir un producto uniforme. Se añaden también nano-inclusiones para mejorar la resistencia al agrietamiento y aumentar la densidad (60).

Estas fórmulas están permitiendo producir paneles de hormigón de pequeño grosor y gran resistencia a la penetración de fragmentos. La inclusión en la fórmula de fibras de acero con los extremos terminados en gancho les proporciona más resistencia a la tensión. Por su parte, el empleo adicional de micro-esferas de vidrio en la mezcla les proporciona ligereza y un aumento de la resistencia a la compresión.

Se han realizado diferentes experimentos comparativos de impactos balísticos sobre muestras de Ductal[®], en su composición original y también añadiéndole fibras, y sobre

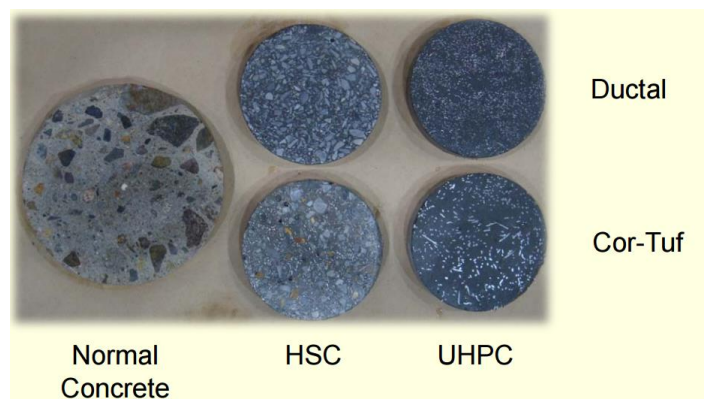


Figura 60: Muestras de UHPC. Fuente: ERDC

muestras de Cor-Tuf. En el test realizado por los *Sandia National Laboratories*, pertenecientes a Lockheed Martin, se han sometido las muestras a una serie de disparos por parte de un arma de 12,70 mm en diferentes condiciones (con una velocidad de impacto media de 930 m/s). Las velocidades de impacto de los proyectiles en el hormigón y la velocidad residual post-penetración se han medido a través de técnicas electrónicas (*Magnetic Velocity Induction System*, MAVIS) y radiográficas, y las imágenes pre y post-penetración se han obtenido mediante cámaras de alta velocidad. (61)

Los resultados de las pruebas indican que las muestras de Cor-Tuf disipan la mayor parte de la energía cinética del proyectil M33 de 12,70 mm (18,1 kJ en el pre-impacto y 2,6 kJ después de atravesar el hormigón). Las muestras de Ductal® sin fibras poseen la menor resistencia a la penetración (4,9 kJ de energía cinética del proyectil después de ser atravesadas) y permiten la mayor velocidad residual post-penetración. Las muestras con fibras se encuentran entre los dos tipos anteriores (4,3 kJ después de la penetración).

También se ha estudiado en detalle el comportamiento del Cor-Tuf ante la penetración de proyectiles por medio de modelos computacionales y el papel que juegan las fibras en esta familia de hormigones. Estas simulaciones muestran, por ejemplo, que las fibras que contiene la composición aumentan su robustez y reducen el área del cráter de impacto y post-impacto, aunque tienen sólo un efecto secundario para conseguir la disminución de la velocidad residual del proyectil tras la penetración. Igualmente, se ha demostrado que un contenido en fibras por encima del 3% no produce una mejora apreciable en el comportamiento del panel (62).

H.1.3. Sistemas de confinamiento celular de arena

La llamada Cuadrícula de Arena Compacta, conocida comercialmente como Sistema de Confinamiento Celular Presto GEOWEB®, fue desarrollada inicialmente por el WES en Vicksburg a finales de la década de 1970 mediante un proyecto de investigación dual entre el Cuerpo de Ingenieros y la empresa *Presto Products* de Appleton, Wisconsin. El concepto original consistía en confinar y compactar arena y terrenos arenosos en elementos celulares interconectados, llamados cuadrículas, para crear la capa base de un pavimento con distribución de carga. El resultado de aquel diseño original tenía aspecto de panal de abejas, relleno de la tierra de alrededor, que se usaba para pavimentar el terreno de forma expedita.

Las secciones de la Cuadrícula de Arena se normalizaron, codificaron y pasaron a formar parte de los suministros de Clase IV en el Cuerpo de Ingenieros del ejército de EE.UU. Estas secciones desmontables median 3,35 x 0,20 x 0,13 m, con un peso de 50 Kg cada una. Se agrupaban en pallets estándar, que contenían 25 secciones, aptos para su transporte táctico.

Según indica el WES, el revestimiento con este material es un 28% más barato que el realizado con sacos terreros, ocupa un 50% menos de espacio, es más duradero (resiste hasta 3 años en buen estado) y requiere entre un 40 y un 70% menos de mano de obra que los sacos textiles. Como inconveniente, su peso es un 15% mayor.

Empleando este sistema, en 1994 se construyeron asentamientos para una batería de 4 obuses de 105 mm en el campo de tiro nº 2 para cadetes de artillería, con un tiempo de trabajo

de 14 horas por asentamiento, un equipo de 7 soldados, una mini-excavadora y dos compactadoras manuales (63).

En los últimos años, el sistema y sus componentes para su uso dual se han ido perfeccionando, mediante el uso de nuevas fórmulas de polietileno para aumentar su robustez y mediante el diseño de diferentes accesorios. La idea del confinamiento de arena o tierra con estructuras de polímeros ha sido también desarrollada por otras empresas estadounidenses, como Geocell, con sede en San Francisco (California). Este producto ha sido denominado *Rapid Deployment Fortification Wall* (RDFW).

En 2003, la Cámara de Representantes concedió fondos específicos (un millón de dólares) al Cuerpo de Marines para pruebas con nuevas tecnologías, que incluían el RDFW de Geocell, lo que ha facilitado que el sistema se perfeccione, y que incluso se plantee que pueda sustituir a los gaviones Hesco-Bastion en un futuro próximo.

Las unidades básicas del RDFW vienen en cajas de a 100, que caben en un vehículo táctico medio. Sus medidas plegadas son 1,22 x 1,22 m x 1,28 cm. Se precisan dos hombres para levantar cada unidad desde la caja, expandirla (su altura pasa a 20,32 cm) y situarla sobre el terreno donde se construirá el muro. Sobre la primera fila de unidades RDFW se van conectando otras unidades, lateral y verticalmente, para ir levantando el muro. Para la unión de las filas en vertical se emplean unos conectores específicos. En los extremos del muro se insertan unas piezas para cerrarlo antes de proceder al relleno con arena (64). La arena queda confinada en celdas de 17,80 x 17,80 x 20,32 cm, que cuentan con unos refuerzos internos. De esta forma, se pueden construir muros continuos reforzados estructuralmente.

El material con el que se fabrica el RDFW es copoliéster, obtenido mediante extrusión de polímeros fundidos. El proveedor de este material para Geocell es la compañía *Eastman Chemical Inc*, con sede en Kingsport (Tennessee).

De las pruebas sobre los primeros RDFW, más tarde denominados *Joint Expeditionary Field Fortifications RDFW*, cabe destacar las pruebas iniciales realizadas por el BZ de la Primera División de Marines en su base de Camp Pendleton, California, durante el verano de 2005. Los marines, ya habituados a utilizar HESCO en Iraq, deseaban comprobar la facilidad de alineamiento vertical del RDFW para construir muros, la rapidez de su instalación, si se producían roturas en el producto, si las piedras aisladas en el relleno podrían actuar como proyectiles, si los rayos UV afectan a este material y si era fácil su reparación o sustitución.

Estos marines consiguieron desplegar 27 m de muro sin relleno en 17 minutos. El relleno de la estructura con dos retroexcavadoras se prolongó 18 minutos, por lo que en 35 minutos el muro básico quedó terminado. Según indicó Geocell, las primeras pruebas fueron satisfactorias.

Cabe destacar el informe, fechado el 3 de febrero de 2006, del Bon. de Zapadores dirigido al mando de la Primera División de Marines, acerca del uso potencial del RDFW por parte de la mencionada unidad durante su despliegue en la operación *Iraqi Freedom*, una de las más importantes en las que participaba el Cuerpo (65).

La Tabla 23 compara el material actual (Hesco-Bastion) con el RDFW.

La carga de un camión con HESCO permite construir 199 metros lineales por un metro de alto.	La carga de un camión con RDFW permite construir 640 metros lineales por 0,80 metros de alto.
El gavión HESCO es inflamable	El material plástico del RDFW se derrite en contacto directo con calor o llama y no alimenta el fuego.
El gavión HESCO se deteriora con rapidez bajo los rayos ultravioleta	El RDFW puede estar desplegado y expuesto directamente al sol durante un periodo acumulado de tres años.
El gavión HESCO no es reutilizable.	El RDFW puede reutilizarse hasta 6 veces.
Para reparar el HESCO, es necesario reemplazar los gaviones completos	El RDFW se repara sustituyendo las partes, o las celdas, de los componentes dañados.
Adquirir materiales para un búnker a base de HESCO (el propio HESCO, madera, ferretería y sacos terreros) tiene un coste medio de \$8.600 (hay que tener en cuenta una media de 10% de desperdicio).	El material en un kit de búnker del RDFW cuesta \$12.600, aunque no hay desperdicio y el sobrante se puede emplear para otras tareas.

Tabla 22: Comparativa entre gaviones Hesco y RDFW. Fuente: elaboración propia.

Más adelante, se estuvieron realizando diferentes pruebas de resistencia ante explosiones de estructuras de RDFW. En la base denominada *Marine Cops Air Ground Combat Center* (MAGCC), junto al pueblo de Twentynine Palms, California, se llevaron a cabo ensayos, detonando sucesivamente dos bloques de 18 Kg de C4, a una distancia de 1,22 m de una misma estructura de RDFW. En esta ocasión, la cara externa del muro se revistió con paneles rellenos de sustancias reductoras de efectos de las explosiones, que se debían pulverizar al recibir la detonación (pólvora piroxilada). Estos paneles sólo se utilizaron en la primera de las dos explosiones sucesivas para comprobar la diferencia de resultados, con y sin panel.

La primera explosión inclinó el muro, respecto al eje vertical, 0,305 m hacia atrás y, respecto al eje horizontal, el centro de muro fue empujado 0,3556 m, quedando la estructura suavemente curvada. Los paneles delanteros protegieron las celdas de la estructura, que resultaron prácticamente intactas. La segunda explosión sobre el mismo muro, ahora sin paneles, provocó una deformación máxima de 0,4826 m, la destrucción parcial de dos filas de celdas y pérdida parcial de su relleno, con lo que el grosor de 1,10 m se redujo a 80 cm. Las ondas de choque se midieron con sensores de presión colocados al frente y detrás del muro. Igualmente, se realizaron pruebas de resistencia balística frente a disparos, desde distintas distancias, con proyectiles de 7,62 mm y de 5,56 mm. De las 7 celdas de anchura del muro de prueba, los proyectiles no pasaron de la segunda.

H.1.4. Refugios y búnkeres prefabricados

El WES ha diseñado un refugio semicilíndrico, compuesto de elementos prefabricados de hormigón, al que se denominó *WES Concrete Arch Shelter*. La unidad básica de este tipo de refugio mide 3,60 m de ancho por 1,20 de largo. Una estructura de 3,60 m de longitud consiste en tres secciones, de 1,20 m de largo (15 cm de espesor y 1,80 m de radio interior), con forma de arco y dos piezas de hormigón para el cierre de los extremos, además de otras piezas metálicas más pequeñas, una envoltura a prueba de agua y una cubierta de tierra de 2,40 m. Las secciones de pared de cierre, construida de una sola pieza, tienen, igualmente, 15 cm de espesor, una puerta de 1,68 x 0,71 m, y pesa 3.175 Kg. El hormigón de los componentes posee una resistencia de compresión de 20,68 MPa, después de un curado de 28 días. Las piezas de acero reforzado tienen una resistencia a la tensión de 275,79 MPa.

El transporte de las secciones y las paredes de los extremos se puede realizar mediante camión, tráiler o helicóptero. Las secciones del refugio se instalan sobre una trinchera cuyo fondo se recubre de un lecho suave o de una capa de arena para evitar el estrés estructural, absorber el choque de una explosión y para minimizar el asentamiento desigual entre las secciones en arco (debe tenerse en cuenta el nivel freático de la zona a la hora de realizar la excavación). Una vez preparado el emplazamiento, las secciones del refugio pueden ser instaladas por un equipo de 6 hombres y un camión-grúa todoterreno.

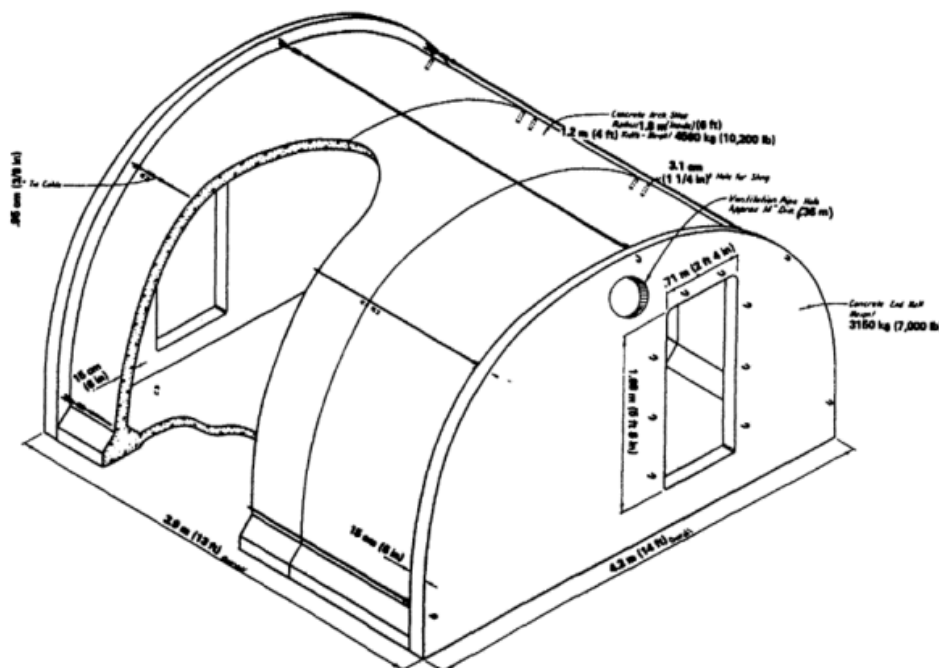


Figura 61: Refugio Arch Shelter. Fuente: WES

Para emplazamientos semipermanentes, se diseñaron búnkeres de combate y de puesto de mando a base de elementos prefabricados de hormigón reforzado de 15 cm de altura, 20 cm de profundidad y diferentes longitudes, desde 0,60 a 3 metros, que pesan aproximadamente 74,40 Kg por metro.

El llamado *Concrete Log Fighting Bunker* se construye con 90 de estas piezas de hormigón prefabricado, sujetas unas a otras mediante pernos de acero. Su fondo se emplaza a 1,02 m por debajo del nivel del terreno (aunque siempre debe tenerse en cuenta el nivel de la capa freática) y su cubierta se construye colocando juntas lateralmente piezas de 3 m de longitud, fijándolas entre sí, de tal forma que resulta una cubierta de 20 cm de grosor y que sobresale 30 cm por los cuatro lados. El búnker cuenta con una tronera para disparar, de 20 x 45 cm y a 1,20 m sobre el nivel del suelo, en cada cara. La entrada/salida se resuelve mediante una pieza redondeada de metal corrugado, de 0.90 x 1,20 m. El diseño cuenta con una salida de emergencia (dos de las piezas de hormigón, junto a la tronera de atrás, son removibles).

El emplazamiento del búnker de combate requiere una excavación de 2,54 m de profundidad, incluidos los 1,02 m por debajo del nivel del terreno (la profundidad puede modificarse en función del nivel freático del emplazamiento). La excavación está prevista mediante maquinaria o de forma manual. Una vez, el emplazamiento está preparado y la pieza de metal corrugado de la entrada esté en su sitio, el búnker lo pueden montar entre 6 hombres en una hora. Se colocan también varias hileras de sacos terreros en la cubierta para poder resistir un impacto directo equivalente a un proyectil de mortero de 81 mm.

El diseño modular de este tipo de búnker permite una amplia variedad de versiones para satisfacer requerimientos específicos, ya sea empleando piezas prefabricadas a la misma escala, o a escalas diferentes.

H.2. Federación Rusa

Ante las nuevas amenazas, se vienen considerando los medios de protección de fuerzas que permitan despliegues rápidos y ágiles, con el empleo de materiales prefabricados para la fortificación de campaña. El centro de referencia para el diseño de sistemas y materiales es la Universidad Técnica Militar de San Petersburgo, fundada en 1997 sobre la base del Instituto Militar de Ingeniería y la Escuela Militar Superior de Ingeniería de Construcción *Pushkin*, y específicamente su Departamento de Fortificación y Construcciones Especiales.

H.2.1. Búnkeres prefabricados

Entre los diseños para fortificación con materiales prefabricados, ya desde la última época soviética, destacan los realizados a base de acero corrugado¹⁴. Hay que resaltar la familia de estructuras prefabricadas denominada KVS (*komplekta Volnistoy Stali*). Se trata de una serie de estructuras de acero corrugado simples y baratas. Se pueden construir sobre el terreno, semienterradas sobre una excavación abierta, o completamente enterradas (a un máximo de 14,60 m de profundidad, o menos si el terreno es húmedo o rocoso). Sus usos más comunes son como puesto de mando, sanitario o refugio para pequeñas unidades. Los refugios KVS son, teóricamente, herméticos y pueden equiparse con sistemas de filtración.

H.2.2. Gaviones de la Federación Rusa

Inspirándose en HESCO, la Agencia de Investigación y Producción de Rusia ha diseñado un tipo de gaviones denominados "Reducto". Se trata de una estructura de rejilla soldada de

metal galvanizado, con forma semi-prismática, con un contenedor de tejido reforzado recubierto de polipropileno o PVC. Se ha diseñado un tamaño estándar y un tamaño grande.

Del 15 al 31 de julio de 2011, una comisión especial del Ministerio de Defensa ruso estuvo realizando pruebas con este material. Durante los ensayos, para emplazar manualmente una sección de 4 unidades, con relleno de tierra local, se emplearon 30 minutos por un equipo de 4 personas. Con ayuda de maquinaria, el tiempo se acortaba a 5-6 minutos. El levantamiento de un muro de protección de 10 m de longitud, de forma mecanizada, sólo necesitó media hora. Igualmente, se realizaron pruebas de resistencia balística y ante explosiones, disparando armas de 7,62 mm desde una distancia de 100 m, lanzando granadas de mano y colocando cargas con metralla.

Aparte este desarrollo, en varios foros del país se impulsa la idea de que se investigue con el uso de nuevos materiales compuestos para el diseño de prefabricados, ya que se considera lo más adecuado en los nuevos escenarios de conflicto que están surgiendo (66).

H.3. Reino Unido

Al igual que sucede en otros países, en este caso no existe un conjunto unificado de estándares para las estructuras que sirvan de protección a las fuerzas, o para la construcción de una base de operaciones. Sin embargo, se llevan a cabo trabajos de investigación y ensayos en el ámbito de lo que se consideran las amenazas actuales, dirigidos al nivel de protección que se estima necesario.

El STANAG-2280, *Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures*, define una matriz con diferentes amenazas y grados de intensidad para cada una de esas amenazas, lo que da lugar a los correspondientes niveles de seguridad que deben cumplir las estructuras de protección. El estándar ha de servir como referencia para indicar qué nivel de protección ofrece un determinado producto y para establecer un lenguaje común a usuarios y diseñadores de esos productos. Por contra, el documento aún no es suficientemente conocido en el Reino Unido y en el resto los países OTAN, ni siquiera en el ámbito de los ingenieros. Incluso, algunos piensan que en los futuros estándares a elaborar, no sólo deben establecerse normas generales, sino que han de redactarse documentos específicos en función del tipo de terreno y de las características de las operaciones (67).

Algunas empresas británicas del sector defensa emplean estándares civiles relativos a protección, como por ejemplo el PAS-68, *Impact Test Specifications for Vehicle Security Barriers*, publicado por la Institución Británica de Estandarización (BSI). Esta norma se ha venido empleando para determinados ensayos con estructuras prefabricadas para protección perimetral ante ataques con vehículos cargados de explosivos (68).

La industria británica de defensa es significativamente activa en el campo del diseño de elementos prefabricados para la protección de fuerzas. Este sector trabaja con un buen nivel de colaboración con el Ministerio de Defensa, y cuenta con el recientemente creado *UK Defence Solutions Centre* para potenciar el trabajo conjunto con el Ministerio y las Unidades militares.

H.3.1. Estructuras modulares

Varias empresas británicas han venido diseñando estructuras basadas en piezas de acero para fortificación de campaña. Tal es el caso de la compañía *Defence Structures*, que produce muros contra explosiones, pantallas contra cohetes, puestos de observación, búnkeres y checkpoints. Esta compañía es filial de *Reidsteel John Reid&Sons Ltd.*

El diseño de búnker de *Defence Structures* permite adoptar configuraciones diferentes, con opciones varias para puertas, ventanas, rejillas de ventilación y troneras. La estructura es ligera, aerotransportable y fácil de ensamblar con las herramientas que acompañan a las piezas componentes. Aunque sus medidas son variables, la estructura estándar tiene 5 m de ancho, por 9,70 m de largo, por 2,4 m de altura. No obstante, la longitud se puede extender sin dificultad. Las piezas de las paredes están construidas tipo membrana celular, absorbentes de energía, y las del techo con chapa de acero enmarcada, todas ellas con pantallas y revestimiento climatológico. Las láminas pueden ser frangibles y se doblan ante una explosión sin fragmentarse, pues el acristalamiento de las ventanas es de policarbonato.

Otros diseños para la protección ante fragmentos de metralla incluyen instalaciones prefabricadas con paredes y techo reforzados a base de componentes galvanizados y capas anti-astillamiento. El esqueleto de soporte se construye de piezas de acero y las puertas están reforzadas contra explosiones.

Igualmente, *Defence Structures* ha diseñado puestos de observación con diferentes configuraciones, para ser fabricados completamente en acero, u hormigón reforzado con una capa de composites y apoyado sobre una estructura de acero. En las paredes se han practicado troneras, dotadas de paneles deslizantes de acero o de policarbonato (69).

H.3.2. Gaviones de Reino Unido

En el campo de los productos prefabricados para estructuras deplegables con pocos medios, destaca la compañía *DefenCell*, parte del grupo de empresas *Franklin* con sede en Londres y también dedicado a la producción de textiles industriales geosintéticos, uniformes, tiendas de campaña, así como ingeniería civil y construcción. El producto principal de *DefenCell* son los contenedores de geotextil. Los geotextiles se definen como "materiales textiles planos, permeables y poliméricos, que se emplean en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería" (Muñoz, Fresno y Ortega, 2000).

DefenCell también denomina a sus contenedores de geotextil "gaviones no metálicos". Con esta denominación desea resaltar el hecho de que no utilizan una malla metálica en cuyo interior va colocado el contenedor de geotextil. La compañía indica que prescindir de una estructura metálica minimiza el riesgo de rebotes y la proyección de fragmentos, tal y como se ha comentado anteriormente en este Trabajo de Fin de Grado. Existen hasta nueve modelos de tamaños y características diferentes de este tipo de contenedores, llamados *Ranger*, *Lite*, *M1*, *DT1*, *T2*, *T3*, *T4*, *Profile 300* y *Profile 500*.

La familia *Ranger*, *Lite* y *M1* son los modelos más pequeños, se pueden rellenar manualmente de forma rápida y están diseñados para protección individual o de pequeñas unidades. El modelo *Range*, NATO Stock Number 5680-99-285-4166, es el contenedor más pequeño y ligero. Pesa 1,60 Kg y tiene un volumen de relleno de 0,47 m³. (70)