



González Albuixech, Vicente Francisco; Rodríguez Millán, Marcos; Ito, T.; Loya Lorenzo, Jose Antonio; Miguelez Garrido, María Henar (2018). Análisis numérico de blindajes cerámicos modulares inspirados en la naturaleza para protecciones balísticas. *Anales de la Mecánica de la Fractura*, 34, pp. 234-241



Financiación: Programa Juan de la Cierva Incorporación 2015, IJCI-2015-23245 y proyecto RTC-2015-3887-8 del programa FEDER del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España.



ANÁLISIS NUMÉRICO DE BLINDAJES CERÁMICOS MODULARES INSPIRADOS EN LA NATURALEZA PARA PROTECCIONES BALÍSTICAS

V.F. GONZÁLEZ-ALBUIXECH^{1*}, M. RODRÍGUEZ-MILLÁN², T. ITO³, J.A. LOYA³,
M.H. MIGUÉLEZ².

¹CIIM (Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica), UPV (Universitat Politècnica de València).
Camino de Vera, s/n 46022 Valencia España.

²Departamento de Ingeniería Mecánica, UC3M (Universidad Carlos III de Madrid).
Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid España.

³Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, UC3M.
Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid España.

* Persona de contacto: vigonal@upv.es

RESUMEN

El aumento en los requerimientos de las protecciones que emplean las fuerzas de seguridad, que deben combinar una alta capacidad de protección y de ergonomía han determinado un creciente interés por el estudio y diseño de protecciones inspiradas en la naturaleza. En este trabajo, se presenta un estudio numérico de la respuesta ante impacto que presentan blindajes cerámicos inspirados en escamas tipo ganoide (esturiones y bichires) y placoide (tiburones y rayas) y la protección de los armadillos. Se consideran impactos perpendiculares a la superficie de protección, oblicuos e impactos dobles. Se concluye que las propiedades de limitar el daño y la fractura asociada a su configuración modular, mejoran su eficacia ante sucesivos impactos, lo que unido a su potencial ergonómico las convierten en candidatas para un estudio más profundo.

PALABRAS CLAVE: Impacto, cerámicas, fractura, protección, blindaje

ABSTRACT

The requirements increase of the protections used by the security forces, which should combine a high capacity for protection and ergonomics, have determined an interest on bioinspired protections. This work presents a numerical study numerical of its role performance against impact. We have considered ceramic armours based on ganoid fish scales (gars, bichirs and reedfishes), placoid fish scales (sharks and rays) and armadillos. Perpendicular impacts to surface protection, oblique and double impacts are considered. It is concluded that the localized damaging and crack arrest properties, associated with its modular configuration, improve their efficiency on multihit situations, besides its potential ergonomic, convert them in suitable candidates for a deeper study.

KEYWORDS: Impact, Ceramics, Fracture, protection, armours

1. INTRODUCCIÓN

Las soluciones óptimas usadas en los blindajes contra proyectiles de alta velocidad, varían de desde el uso de polímeros para el caso de proyectiles con menor penetración al uso de placas frontales de cerámica para el caso de proyectiles duros con alto poder penetrador. La principal contribución de la cerámica, en los equipos de protección individual (EPI), es la fragmentación y erosión del proyectil junto con la dispersión de energía que ello supone [1].

Un componente individual de cerámica solo ofrece una protección limitada ante proyectiles, por tanto, las protecciones cerámicas están reforzadas por una placa

de apoyo de otro material. Incrementándose drásticamente su eficacia.

La comodidad del EPI también es un aspecto importante a considerar, debido a que debe permitir la realización de tareas cotidianas, para evitar el descartar el uso de la protección, lo que puede producir resultados funestos en ataques inesperados [2]. Igualmente, otro requerimiento importante es la protección contra armas automáticas, en las que múltiples balas son disparadas, casi simultáneamente, hacia un mismo blanco. Sin embargo, solo existen pocos estudios [3-5], que resultan en que la protección disminuye sustancialmente tras el primer impacto.

Estos requerimientos han motivado un incremento en el interés que suscitan las bioprotecciones de algunos animales, que combinan protección, movilidad y bajo peso [6]. Algunos autores han analizado el comportamiento ante impactos de algunas de esas protecciones [7, 8], incluso considerando modelos basados en las escamas de [9, 10]. Sin embargo, son necesarios más estudios de su comportamiento para una utilización en situaciones reales.

Este trabajo se centra en el análisis numérico de diversas alternativas de blindajes bioinspirados mediante cálculo con elementos finitos en 3-D. La eficacia de cada blindaje considerado se compara mediante la energía cinética absorbida y distribución de daño calculada en el programa comercial de elementos finitos ABAQUS/explicit.

Las configuraciones consideradas se corresponden con escamas de peces tipo ganoide (esturiones y bichires), tipo placoide (tiburones y rayas) y la protección de los armadillos. Se consideran impactos perpendiculares a la superficie de protección, oblicuos e impactos dobles. El objetivo del estudio consiste en considerar la respuesta del material cerámico que imita la geometría de las protecciones bioinspiradas.

2. Modelado de las protecciones bioinspiradas y de la munición

Se han analizado tres configuraciones para un blindaje frontal de alúmina inspiradas en protecciones naturales de carácter modular comparándolas con configuraciones no modulares.

Han sido analizadas dos configuraciones basadas en escamas de pez (con diferentes geometrías y configuración de ensamblaje entre los módulos) y una tercera configuración, similar a las protecciones de un armadillo. Las diferentes formas de ensamblaje entre los módulos individuales de las distintas configuraciones y las diversas geometrías de la superficie exterior donde se produce el impacto, de una forma muy simplificada, permiten considerar de forma cualitativa la eficacia y comportamiento para un gran rango de diseños.

El primer modelo modular se basa en las escamas de pez tipo ganoide. Este tipo de escamas, que aparecen principalmente en esturiones y bichires, tiene forma de diamante y son duras y brillantes debido a la presencia de compuestos de guanina. La segunda configuración son las escamas tipo placoide, que aparecen en rayas y tiburones, están compuestas por dentina y una capa superior dura de vitrodentina, se apoyan mediante espinas que las unen a una capa basal sobre el resto de la piel. La tercera configuración se basa en la protección de los armadillos, formada por placas de una piel con aspecto de hueso. la Figura 1 muestra el aspecto de las distintas protecciones naturales.

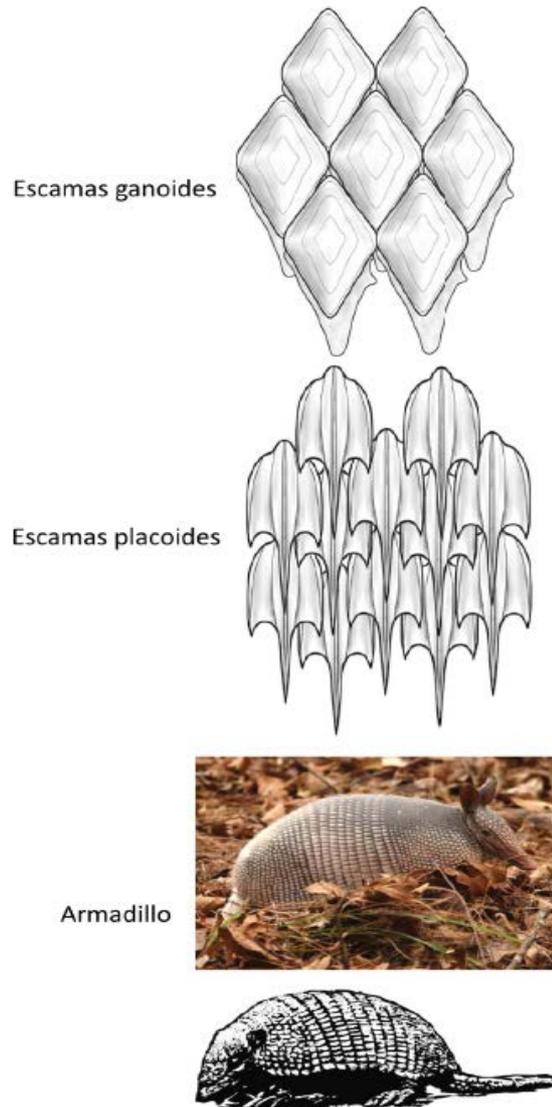


Figura 1. Imágenes descriptivas y ejemplo de las distintas configuraciones de protecciones naturales consideradas.

El modelo para las escamas de tipo ganoide está compuesto por dos partes, la parte superior la parte con forma de diamante recibe el impacto, mientras que la parte inferior formada por formas geométricas tipo piramidales es donde se crea el montaje con las demás partes del blindaje. Para el modelo de las escamas de tipo placoide se usa una simplificación mediante prismas. Hay dos tipos de módulos. La diferencia es la altura a la que están las alas. También presentan una protuberancia en forma de pico en la parte frontal y un hueco en la otra, que se usan para controlar el movimiento vertical de los módulos. Finalmente, el modelo para el armadillo se forma mediante módulos extruidos, o bandas, que se acomodan usando la parte frontal de un módulo y la parte hueca de la siguiente. En la Figura 2 se presenta un esquema de las dimensiones simplificación modular y el ensamblaje usados en el análisis.

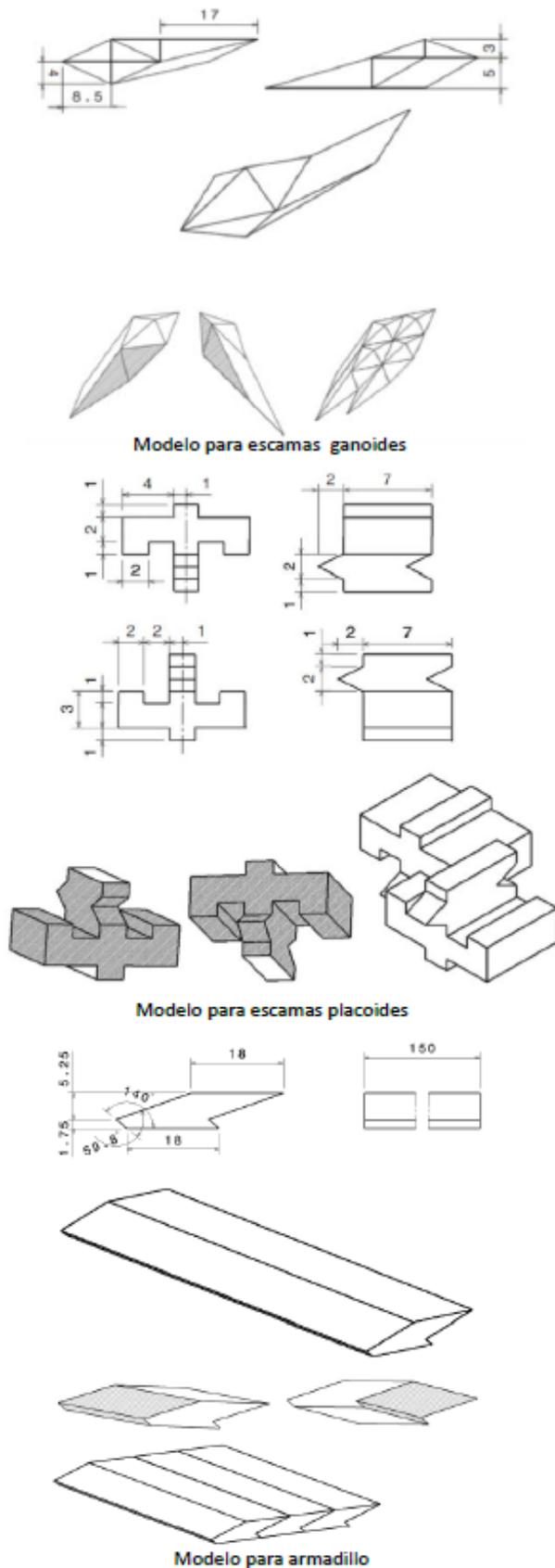


Figura 2. Imágenes descriptivas y ejemplo de las distintas configuraciones de protecciones naturales consideradas.

La placa de refuerzo, necesaria para dar un comportamiento real y soporte a la protección cerámica, es, por simplicidad, una placa de aluminio con un espesor que esté en el en el rango de propiedades óptimas para la composición cerámica-metal [11,12].

Finalmente, para la munición se usa un modelo correspondiente a munición real. El proyectil es una bala de 9 mm tipo FMJ, con un peso de 8 g y utilizado como munición de entrenamiento por las tropas de la OTAN. La bala tiene dos componentes, una camisa de latón y un núcleo de plomo. Las dimensiones se definen según [13].

3. Modelo

3.1. Modelado de los materiales

El comportamiento temoviscoplastico de los metales es habitualmente modelado mediante el modelo de Johnson-Cook(JC) [14]. Este modelo constitutivo permite incluir la deformación y el endurecimiento por deformación que ocurre en la deformación dinámica del material, además, contiene el ablandamiento debido a la temperatura y un modelo de daño. El modelo JC se encuentra implementado en ABAQUS, [15].

Para simular el comportamiento del núcleo de plomo se emplea la ecuación hidrodinámica de Mie-Grüneisen disponible en ABAQUS, [15].

Finalmente, el comportamiento de la cerámica es considerado mediante el modelo de Johnson-Holmquist 2 (JH-2) [16]. El modelo se plantea en términos de presión hidrostática y tensiones normalizadas. El comportamiento del material obedece a una ley elástico-lineal hasta la tensión equivalente normalizada, considerándose un comportamiento diferente para la cerámica dañada y la intacta. Incluye un modelo de daño y una ecuación de estado. También es accesible en ABAQUS, [15].

En la tabla 1 aparecen los parámetros de los diversos materiales simulados en sus respectivos modelos materiales.

Tabla 1. Parámetros de los materiales

Blindaje					
Aluminio 2024T351 (JC [17])					
ρ_0 [Kg/m ³]	2770	E [GPa]	74,66	ν	0,3
A	352	B	440	n	0,42
m	1	T _m [K]	775	T ₀ [K]	293
C	0,008	D ₁	0,112	D ₂	0,123
D ₃	1,5	D ₄	0,007	D ₅	0,0

Alúmina, Al ₂ O ₃ , 96% (JH-2 [18])					
ρ_o [Kg/m ³]	3850	G [GPa]	152	A	0,88
B	0,45	C	0,007	n	0,64
m	0,6	t [GPa]	0,462	P _{HEL} [Gpa]	4
β	1	D ₁	0,0125	D ₂	0,7
K ₁ [Gpa]	231	K ₂ [Gpa]	-160	K ₃ [Gpa]	774
Bala FMJ 9mm					
Chaqueta de latón (JC [19])					
ρ_o [Kg/m ³]	8520	E [GPa]	110	ν	0,375
A	112	B	505	n	0,42
m	1,68	T _m [K]	1189	T ₀ [K]	373
C	0,009	D ₁	0,54	D ₂	0,54
D ₃	3,03	D ₄	0,014	D ₅	1,12
Núcleo de plomo (Mie-Grüneisen [19])					
ρ_o [Kg/m ³]	1184	G [GPa]	200	c ₀ [cm/ηs]	0,201
s _α	2,6	E _m	0		

3.2. Simulación de las configuraciones de blindaje

La mayoría de los análisis disponibles en la literatura consideran únicamente un blindaje formado por un conjunto de placas monolíticas impactadas por proyectiles. Nuestro objetivo es investigar el comportamiento de blindajes modulares inspirados en protecciones de distintos animales. Sin embargo, se han incluido configuraciones de placas monolíticas para realizar comparaciones. El blindaje considerado, en todos los casos, tiene una parte frontal cerámica de alúmina 96%, de forma monolítica o modular, y una parte trasera de apoyo de aluminio. Los espesores en las placas monolíticas frontales han sido escogidos para tener un espesor correspondiente a los espesores medios de las distintas configuraciones modulares bioinspiradas. La placa de aluminio tiene espesor constante en todas las simulaciones.

La placa frontal de cerámica monolítica se define como cuadrada de lado 150mm. La malla de elementos finitos es de hexaedros, con un tamaño de elemento variable, de mayor a menor hacia el centro de la placa, donde hay una zona con una malla de elementos regulares y tamaño aproximado de 0,5 mm. El blindaje cerámico está centrado sobre la placa posterior de aluminio. La placa de apoyo e aluminio es una placa cuadrada de lado 200 mm y espesor 6 mm, la malla de esta placa sigue el mismo esquema que la de la malla de la placa frontal. Los laterales de la placa metálica se consideran empotrados y se aplican condiciones de contacto entre la placa frontal y la posterior. La figura 3 muestra un ejemplo de este tipo de configuración.

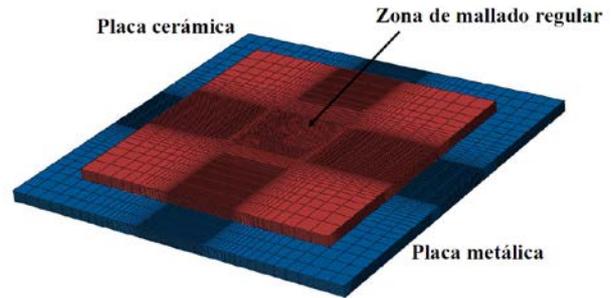


Figura 3. Detalle de la configuración y malla de placas monolíticas.

En el estudio de las distintas configuraciones modulares, solo se sustituye la placa frontal cerámica por un ensamblaje de módulos que se inspiran en las protecciones naturales, que también está lo más centrado posible sobre la placa metálica de refuerzo. En todos los casos se asume contacto entre los distintos módulos y placas.

Para la configuración inspirada en las escamas tipo ganoides y para la configuración basada en las escamas tipo placoides se mullan los módulos alejados a la zona de impacto con un tamaño de elemento elevado y los módulos que están en la zona de impacto con un tamaño de elemento de 0,5 mm, en ambos casos se usa un mallado tipo estructurado de ABAQUS. La figura 4 y la 5 presentan la malla y geometría para las configuraciones basada en escamas tipo ganoides y placoides respectivamente.

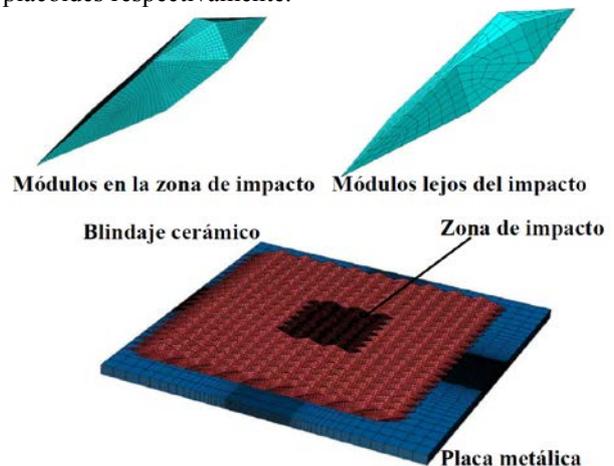


Figura 4. Detalle de la configuración y malla de la estructura modular inspirada por las escamas ganoides.

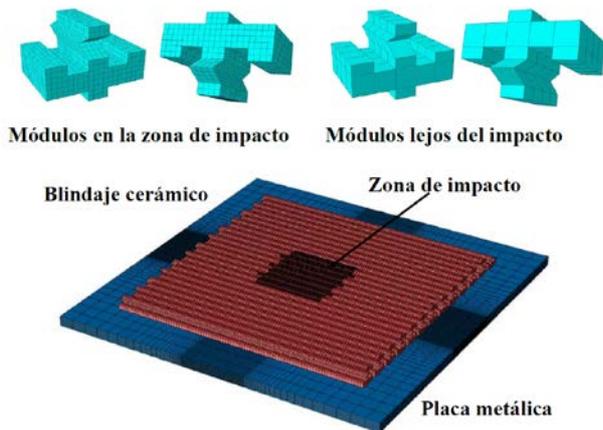


Figura 5. Detalle de la configuración y malla de la estructura modular inspirada por las escamas placoides.

Para la configuración basada en la protección de los armadillos, en la que los módulos son bandas alargadas, se malla las bandas alejadas de la zona de impacto regularmente con un tamaño relativamente grande y en las bandas que están en la zona de impacto se distinguen dos partes, una parte afectada por el impacto malla de forma estructurada con un tamaño de elemento de 0,5 mm y el resto de la banda donde se hace un mallado orientado a la zona de impacto. La figura 6 presenta la configuración y malla del modelo basado en el armadillo.

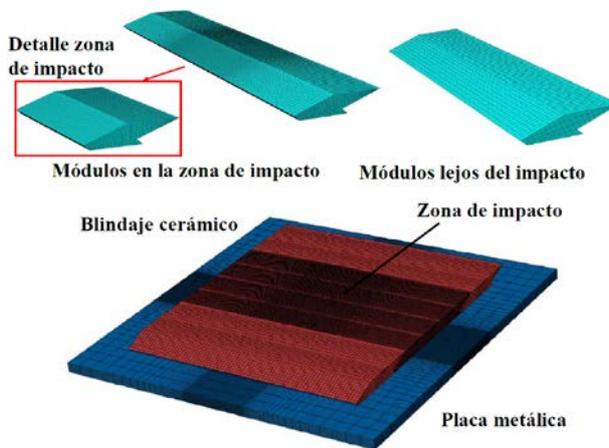


Figura 6. Detalle de la configuración y malla de la estructura modular inspirada por el armadillo.

Finalmente, en la figura 7, se puede observar el mallado empleado en la bala y en su camisa y núcleo, entre los que se aplican condiciones de contacto.



Figura 7. Detalle de la malla para la bala FMJ de 9 mm. De izquierda a derecha: núcleo, camisa y bala completa.

4. RESULTADOS NÚMERICOS Y DISCUSIÓN

Las configuraciones propuestas son analizadas usando simulaciones numéricas que cubren distintas situaciones desde un punto de vista simplificado. Se van a considerar impactos normales, oblicuo e impactos dobles. Debido a la gran cantidad de parámetros asociados con cada situación es enorme, solo se modelan casos sencillos, comparándose la forma de la propagación del daño y la energía cinética absorbida. El tiempo de la simulación es 0,75 ms y la velocidad inicial de impacto es $v=900 \text{ ms}^{-1}$; de tal manera, que la bala atravesase el blindaje.

4.1. Impactos normales al blindaje

El primer conjunto de simulaciones se corresponde con el caso de impactos normales en la parte superior del blindaje, se consideran dos subcasos, figura 8, uno en que la bala está alineada con la dirección de impacto y otro en que la bala está inclinada 30 grados respecto a la dirección de impacto.

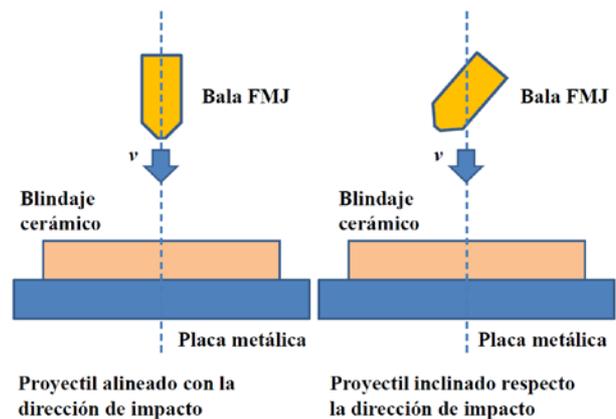


Figura 8. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje.

La tabla 2 presenta las eficiencias en energía cinética absorbida para cada configuración modular, en porcentaje, respecto a la placa monolítica del mismo espesor medio.

Tabla 2. Eficiencia [%] en la proporción de energía cinética absorbida entre cada configuración modular bioinspirada y la placa monolítica con el mismo espesor, para impacto normal.

	Placoide	Ganoide	Armadillo
alineado	89	85	96
inclinado	96	91	100

En las figuras 9 y 10 se puede observar el daño registrado en las simulaciones, respectivamente para el caso de la bala alineada con la trayectoria de impacto o inclinada respecto a ésta.

Impacto normal, bala alineada con la dirección de impacto

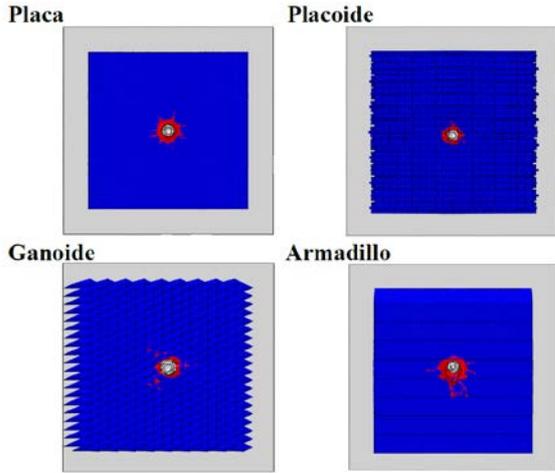


Figura 9. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje con la bala alineada con la dirección de impacto.

Impacto normal, bala inclinada respecto a la dirección de impacto

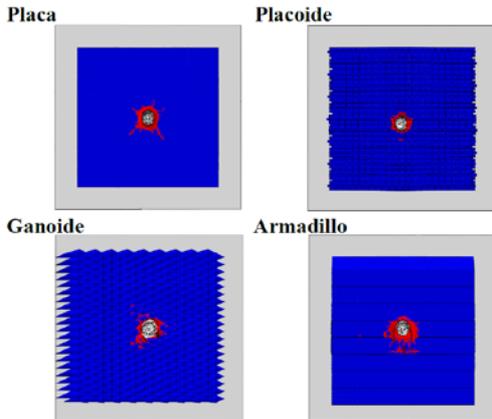


Figura 10. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje con la bala inclinada respecto a la dirección de impacto.

Se puede observar que en comparación con la placa monolítica la protección que ofrecen los blindajes modulares es bastante inferior si la bala está alineada respecto a la dirección de impacto, pero prácticamente equivalente para balas inclinadas. Además, el daño en el blindaje por la propagación de grietas debido al efecto del impacto está más localizado en los blindajes modulares, el daño observado en la protección correspondiente al armadillo está restringido, en su mayoría, en el módulo superior con lo que hay mayor región no afectada para detener impactos posteriores.

4.2. Impactos oblicuos al blindaje

El segundo conjunto de simulaciones se corresponde con el caso de impactos oblicuos 30 grados a la parte superior del blindaje, se consideran dos subcasos, figura 11, uno en que la bala está alineada con la dirección de impacto y otro en que la bala está inclinada 30 grados respecto a la dirección de impacto.

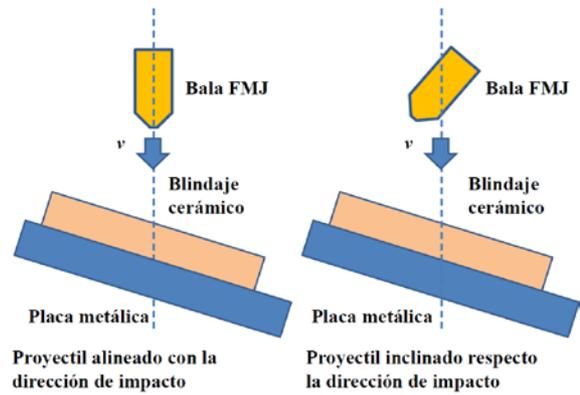


Figura 11. Esquema geométrico de los impactos oblicuos al blindaje.

La tabla 3 presenta las eficiencias en energía cinética absorbida para cada configuración modular, en porcentaje, respecto a la placa monolítica del mismo espesor medio.

Tabla 3. Eficiencia [%] en la proporción de energía cinética absorbida entre cada configuración modular bioinspirada y la placa monolítica con el mismo espesor, para impacto oblicuo.

	Placoide	Ganoide	Armadillo
alineado	93	93	98
inclinado	94	88	97

En las figuras 12 y 13 se puede observar el daño registrado en las simulaciones, respectivamente para el caso de la bala alineada con la trayectoria de impacto o inclinada respecto a ésta.

Impacto oblicuo, bala alineada con la dirección de impacto

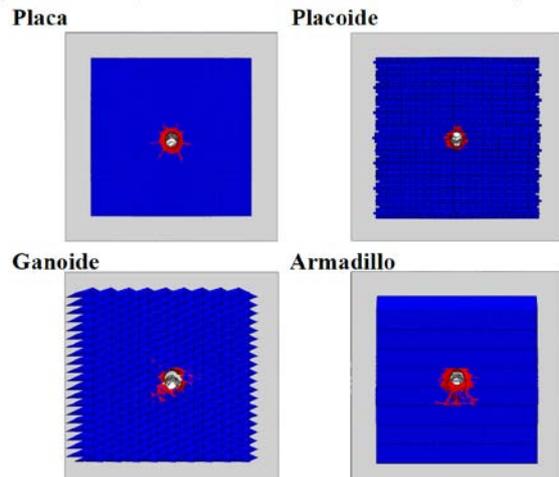


Figura 12. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje con la bala alineada con la dirección de impacto.

Impacto oblicuo, bala inclinada respecto a la dirección de impacto

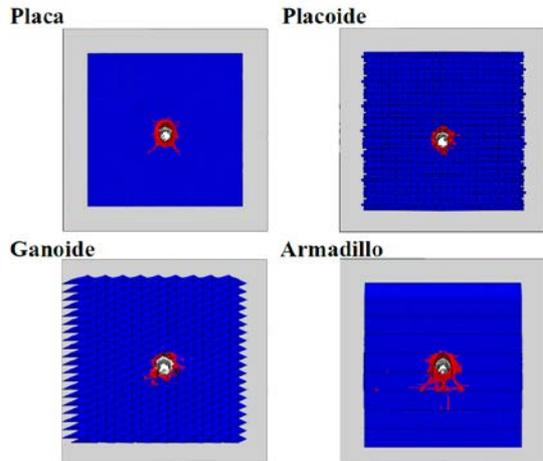


Figura 13. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje con la bala inclinada respecto a la dirección de impacto.

En caso de impactos oblicuos la protección ofrecida por las configuraciones modulares y la monolítica son muy similares, el esquema de daño sigue siendo más localizado en la modular, el daño observado en la protección correspondiente al armadillo solo está localizada en el módulo superior. Sin embargo, dependiendo de la trayectoria e inclinación de la bala, puede ocurrir que uno de los módulos salte o se mueva arrastrado por el impacto reduciendo su eficacia, con lo que la unión entre ellos puede ser crítico.

4.3. Impacto doble

El último estudio se corresponde con un impacto doble, figura 14, la eficiencia en energía observada se presenta en la tabla 4 y el esquema de dañado en la figura 15.

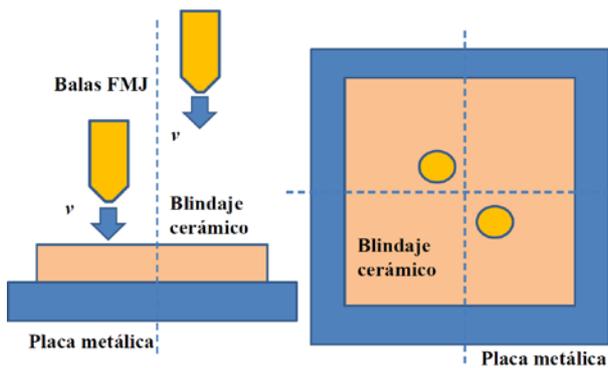


Figura 14. Esquema geométrico de impacto doble.

Tabla 4. Eficiencia [%] en la proporción de energía cinética absorbida entre cada configuración modular bioinspirada y la placa monolítica con el mismo espesor, para impacto doble.

	Placoide	Ganoide	Armadillo
doble	92	104	91

Impacto doble

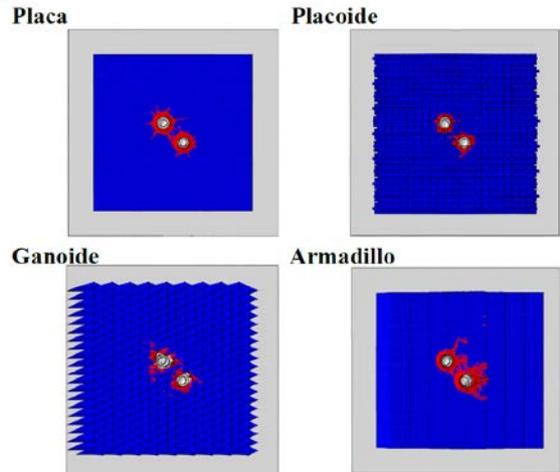


Figura 15. Esquema geométrico de los impactos normales al blindaje.

La protección ofrecida en el caso de varios impactos es prácticamente igual, o ligeramente superior, en los casos modulares respecto a las protecciones tipo placa, el tamaño relativo entre el módulo y el proyectil y la distancia entre impactos son factores clave en este caso que se consideran en estudios posteriores. La cercanía entre impactos en una placa hace que el patrón de dañado se interseque o que la bala percuta en una zona ya dañada en un impacto previo, lo cual reduce su eficacia. Con un estudio adecuado de la configuración de los módulos, este efecto perjudicial puede ser educido sensiblemente.

5. CONCLUSIONES

Se han propuesto diversas configuraciones de blindajes modulares basadas en protecciones naturales, que consideran diversas geometrías, tamaño de módulos y tipos de ensamblaje entre ellos. Se han simulado diversos tipos de impactos para intentar abarcar un amplio rango de condiciones de servicio y obtener una aproximación de la eficacia general del blindaje. Los resultados indica que el tamaño del módulo afecta la eficacia. En comparación con los blindajes tipo placa, los modulares se comportan peor, entre otras cosas debido al confinamiento de las ondas de tensión, especialmente para de impactos directos, que no es la situación más habitual. Sin embargo, su eficacia es muy similar en impactos oblicuos e incluso un poco mejor para varios impactos. Además, la estructura modular, unida a una mayor localización del daño en el blindaje, puede facilitar su reparación, lo que disminuye el coste y mantenimiento de las protecciones. Por tanto, en condiciones de combate y explosiones el uso de blindajes modulares puede ser interesante, al ser el dañado de cada módulo casi independiente del estado del resto del blindaje.

Las protecciones modulares ofrecen además la ventaja de una mayor ergonomía. En caso de que se tenga que realizar trabajos o actividades, cuando es necesario el

uso de protecciones, esta ventaja puede ser crítica, ya que muchos trabajadores desechan su uso en actividades agotadoras o en las que suponen una molestia, quedando así sin protección. Incluso cuando se sigue trabajando con las protecciones, una mayor ergonomía influye en una mayor rapidez y calidad en las tareas a realizar.

En conclusión, incluso considerando que ofrecen una menor protección ante impactos directos, la utilización de configuraciones modulares bioinspiradas presentan propiedades muy interesantes que justifican su posible utilización para protegerse de metralla, varios impactos o para aumentar la comodidad y productividad de los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer, por el soporte económico, al trabajo al programa Juan de la cierva Incorporación 2015, IJCI-2015-23245 y al proyecto RTC-2015-3887-8 del programa FEDER del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España.

REFERENCIAS

- [1] Woodhead Publishing. Limited, Advances in military textiles and personal equipment, Woodhead Publishing, 2012.
- [2] K. N. B. Larsen, B. Aisbett, Task-specific effects of modular body armor, *Military Medicine* **179**, 428-434, 2014.
- [3] L. Deka, S. Bartus, U. Vaidya, Multi-site impact response of s2-glass/epoxy composite laminates, *Composites Science and Technology* **69**, 725-735, 2009.
- [4] B. Russell, Multi-hit ballistic damage characterisation of 304 stainless steel plates with finite elements, *Materials and Design* **58**, 252-264, 2014.
- [5] D. P. M. Grujicic, N. Coutries, A computational investigation of the multihit ballistic-protection performance of laminated transparent-armor systems, *Journal of Materials Engineering and Performance* **21**, 1-12, 2012.
- [6] W. Yang, I. H. Chen, B. Gludovatz, E. A. Zimmermann, R. O. Ritchie, M. A. Meyers, Natural flexible dermal armor, *Advanced Materials* **25**, 31-48, 2013.
- [7] L. Grunenfelder, N. Suksangpanya, C. Salinas, G. Milliron, N. Yaraghi, S. Herrera, K. Evans-Lutterodt, S. Nutt, P. Zavattieri, D. Kisailus, Bioinspired impact-resistant composites, *Acta Biomaterialia* **10**, 399-400, 2014.
- [8] E. Flores-Johnson, L. Shen, I. Guimatsia, G. D. Nguyen, Numerical investigation of the impact behaviour of bioinspired nacre-like aluminium composite plates, *Composites Science and Technology* **96**, 13-22, 2014.
- [9] P. Liu, D. Zhu, Y. Yao, J. Wang, T. Q. Bui, Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system, *Materials and Design* **99**, 201-210, 2016.
- [10] R. K. Chintapalli, M. Mirkhalaf, A. K. Dastjerdi, F. Barthelat, Fabrication, testing and modeling of a new flexible armor inspired from natural fish scales and osteoderms, *Bioinspiration and Biomimetics* **9**, 036005, 2014.
- [11] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar, G. Tan, Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach, *International Journal of Impact Engineering* **52**, 37-46, 2016.
- [12] A. Serjouei, Empirical ballistic limit velocity model for bi-layer ceramic-metal armor, *International Journal of Protective structures* **6**, 509-527, 2015.
- [13] NATO, Standardization agreement: small arms ammunition (9 mm parabellum), Military Agency for Standardization, STANGAG 4090.
- [14] G. Johnson, W. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates and high temperatures, *In: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics* 541-547, 1983.
- [15] D. Systemes, Abaqus v6.12 documentation, ABAQUS Inc; 6.12.
- [16] G. Johnson, T. Holmquist, An improved computational constitutive model for brittle materials, *High Pressure Science and Technology- 1993. Institute of Physics Conference Proceedings* **309**, 981—994, 1993.
- [17] X. Teng, T. Wierzbicki, Effects of fracture criteria on high velocity perforation of thin beams, *International Journal of Computational Methods* **1**, 171-200, 204.
- [18] A. Morka, J. Nowak, Numerical analyses of ceramic/metal ballistic panels, *Journal of KONES Powertrain and Transport* **19**, 465-492, 2012.
- [19] K.M. Tse, Development of a realistic finite element model of human head and its applications to head injury, PhD Dissertation: National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, 2014.