



## Análisis del comportamiento de una estructura cerámica/aluminio durante el impacto del proyectil 7,62 mm

### Behavior analysis of structure ceramic/aluminum during the impact of the projectile 7,62 mm

Alexis Ortiz-Lahera<sup>1,\*</sup>, Jaime González-Albiza<sup>II</sup>

I. Ministerio del Interior, Centro de Investigación y Desarrollo Técnico, CIDT. La Habana, Cuba.

II. Universidad Tecnológica de La Habana, Facultad de Ingeniería Mecánica, Dpto. de Ingeniería Mecánica. La Habana, Cuba.

\* Autor de correspondencia: [cidt@mn.mn.co.cu](mailto:cidt@mn.mn.co.cu) [aolahera67@gmail.com](mailto:aolahera67@gmail.com)

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo una licencia [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 22 de julio de 2024

Aceptado: 30 de agosto de 2024

#### Resumen

Se analizó el comportamiento de la balística de efectos en estructuras blindadas formadas por losas cerámicas de alúmina CC-01 con respaldo de una placa de aluminio AA 6061 y una lámina testigo de aluminio AA 1065. Las estructuras fueron ensayadas con disparo real y con la realización de simulaciones computacionales, a partir de la selección de los modelos constitutivos Johnson – Cook y Johnson – Holmquist; así como el empleo de los métodos de elementos finitos correspondientes a la discretización combinada Lagrange/Euler y la hidrodinámica de partículas suavizadas SPH. La experimentación incluyó el análisis de la respuesta mecánica de las losas cerámicas de alúmina

CC-01 con espesor de 12 mm cada una, impactadas por el proyectil calibre 7,62 mm formado por un encamisado bimetálico acero/latón, un relleno de plomo y un núcleo de acero ASTM 1015. La combinación de dos losas de cerámica de alúmina CC-01 con respaldo de una placa de aluminio AA 6061 con 6,35 mm de espesor, fue capaz de retener al proyectil calibre 7,62 mm a velocidades inferiores a 700 ms<sup>-1</sup>.

**Palabras claves:** impacto balístico, estructura cerámica, balística de efectos.

#### Abstract

Was analyzed the behavior the ballistics effects on shielded structures formed by alumina ceramic tiles CC-01 with back squab an aluminum plate AA 6061 and a witness plate aluminum AA 1065. The structures were tested with real shot and with the realization computational simulations from the selection the constitutive models Johnson – Cook and Johnson – Holmquist; as well as the selection of the dimensional values from corresponding finite element methods to the combined discretization Lagrange Euler ALE and the Smoothed particle hydrodynamics SPH. The experimentation included the analysis the mechanical

answer the alumina ceramic tile CC-01 with 12 mm of thickness, impacted for 7,62 mm calibrate projectile and compound by a bimetallic jacket steel/brass, a leaden stuffing and a nucleus steel ASTM 1015. The combination of two alumina ceramic tiles CC-01 with back squab an aluminum plate AA 6061 with 6,35 mm thickness, was able to retain the projectile 7,62 mm at 700 ms<sup>-1</sup> velocity.

**Key words:** ballistic impact, ceramic structure, ballistics effects.

#### Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Ortiz Lahera A, González Albiza J. Análisis del comportamiento de una estructura cerámica/aluminio durante el impacto del proyectil 7,62 mm. Ingeniería Mecánica. 2024;27(3):e699.

## 1. Introducción

Los fenómenos de impacto y penetración mecánicos son estudiados como fundamentos de cálculo y diseño de las estructuras blindadas ante la protección de los proyectiles definidos a retener. Este fenómeno es analizado a partir de ensayos con disparos reales, ecuaciones empíricas Recht – Ipson [1] y con simulaciones computacionales basadas en herramientas con métodos de elementos finitos y los modelos constitutivos de los materiales.

El impacto balístico en estructuras blindadas se produce en un tiempo  $t \leq 100 \mu\text{s}$  y sólo es posible su observación y estudio a partir del empleo de modernas tecnologías con cámaras fotográficas ultrarrápidas [2] y termográficas, así como a partir de la utilización de herramientas de simulación computacional, tales como: ABAQUS CAE, LS-DYNA y Ansys/Autodyn [3].

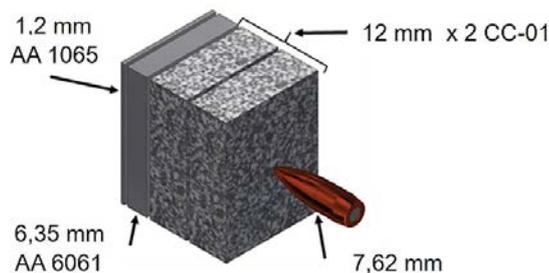
En el caso específico de las cerámicas, el granito y los vidrios, estas estructuras son de carácter rígido y, al ser impactadas por proyectiles con núcleo como el acero, ocasionan múltiples grietas en el interior del material, en una o en ambas caras de la estructura [4]. De ocurrir el impacto a velocidades  $v > 500 \text{ ms}^{-1}$ , se origina la fragmentación generalizada de toda la estructura, incluida la posible pérdida de masa del propio proyectil y una marcada propagación de ondas elastoplásticas [5, 6].

La presente investigación se basa en la balística de efectos y en el impacto mecánico a una velocidad  $v = 700 \text{ ms}^{-1}$  de un proyectil calibre 7,62 mm del fusil de asalto AKM en una estructura blindada formada por dos losas cerámicas de alúmina CC-01, una placa respaldo de aluminio AA 6061 y una lámina testigo de aluminio AA 1065. Con el estudio de la balística y el impacto, esta investigación tiene como objetivo principal conocer el fenómeno físico-mecánico del comportamiento de la estructura mixta cerámica/aluminio durante el impacto del proyectil calibre 7,62 mm, determinar la capacidad de penetración y validar las experimentaciones virtuales para disminuir la cantidad de experimentos con disparo real.

## 2. Métodos y Materiales

Los ensayos se realizaron con un fusil de asalto AKM y con las municiones 7,62 x 39 mm, de acuerdo a la norma de la Federación de Rusia [GOST P 50744-95](#). Los proyectiles están compuestos por un núcleo de acero ASTM 1015, un relleno de plomo y un encamisado bimetálico acero/latón. La experimentación con disparo real se realizó en nueve muestras (desde M1 hasta M9) de estructuras blindadas en un campo de tiro a cinco metros de distancia entre la boca del cañón del fusil y la cara frontal de las estructuras [7].

Las estructuras se enmarcaron por chapas de acero, las cuales contienen a los materiales blindados y a la lámina testigo [8]. Está formada por dos losas cerámicas CC-01 con 12 mm de espesor cada una, una placa de respaldo de aluminio AA 6061 con 6,35 mm de espesor y como material testigo para conocer la deformación posterior provocada por el proyectil en la estructura se dispuso de una lámina de aluminio AA 1065 con un espesor de 1,2 mm, figura 1 y tabla 1. Adicionalmente, se incluyeron los tres materiales que conforman al proyectil: el núcleo ASTM 1015, el relleno de plomo y el encamisado bimetálico acero-latón.



**Fig. 1.** Modelo geométrico correspondiente a las muestras empleadas durante la experimentación. Fuente: autores

**Tabla 1.** Materiales seleccionados para esta investigación. Fuente: Autores

No.	Denominación	Descripción
1	Aluminio AA 1065	Lámina testigo de 1,2 mm de espesor
2	Aluminio AA 6061	Placa respaldo de 6,35 mm de espesor
3	Losa cerámica CC-01	Losa de 12 mm de espesor

### 2.1. Instrumentos empleados en la experimentación

- Se utilizó un cronógrafo Chrony M-1 año 2020, fabricado en los EEUU ( $3 \text{ ms}^{-1}$  de error a  $600 \text{ ms}^{-1}$ ) para medir la velocidad inicial  $v_0$  de los proyectiles
- Para las mediciones de las distancias en el terreno se emplearon dos flexómetros analógicos TRUPER de fabricación China, año 2019, 1 mm de error
- Para las mediciones de los desplazamientos y deformaciones, provocadas por los impactos de los proyectiles, se utilizaron un pie de rey digital Mitutoyo ABSOLUTE Solar DIGIMATIC, año 2020, Japón, 0,03 mm de error, un micrómetro digital Mitutoyo japonés, año 2020, 2  $\mu\text{m}$  de error, un calibre de altura analógico Mitutoyo japonés, año 2015, 0,03 mm de error y una mesa de planitud de granito Mitutoyo de Japón, año 2015, 4  $\mu\text{m}$  de error
- Fue empleado un higrómetro analógico MT, año 2019, de fabricación Alemana para medir la temperatura ambiente y la humedad relativa, 0,5  $^{\circ}\text{C}$  de error y 5 % de humedad relativa de error

## 2.2. Selección de los Métodos discretos con elementos finitos

Las simulaciones se basaron en el empleo de los métodos discretos de mallado para los modelos geométricos y en la definición de los modelos constitutivos para cada material de los proyectiles y de las estructuras. Se seleccionó el método de hidrodinámica de partículas suavizadas *Smoothed Particle Hydrodynamics SPH* [9, 10], con un ajuste del espaciado entre las partículas de 0,2 mm para la geometría compleja del proyectil; así como un espaciado de 0,5 mm entre las partículas de las losas cerámicas CC-01.

A los modelos geométricos de la placa de respaldo de aluminio AA 6061 y la lámina testigo de aluminio AA 1065, se les aplicó el método mixto Lagrange/Euler ALE. Se seleccionó un mallado con elemento cúbico tipo hexaedro y de ocho nodos; con un tamaño de 0,3 mm para simplificar los problemas de cálculo y aportar ahorro en la disminución de los tiempos de procesamiento; ya que en estas placas posteriores se estiman deformaciones mínimas con comportamiento dúctil. Los modelos geométricos y las simulaciones se realizaron a partir de herramientas de diseño y cálculo comerciales. En la figura 2 se representa un esquema con la asignación de los elementos finitos para cada modelo geométrico de la estructura.

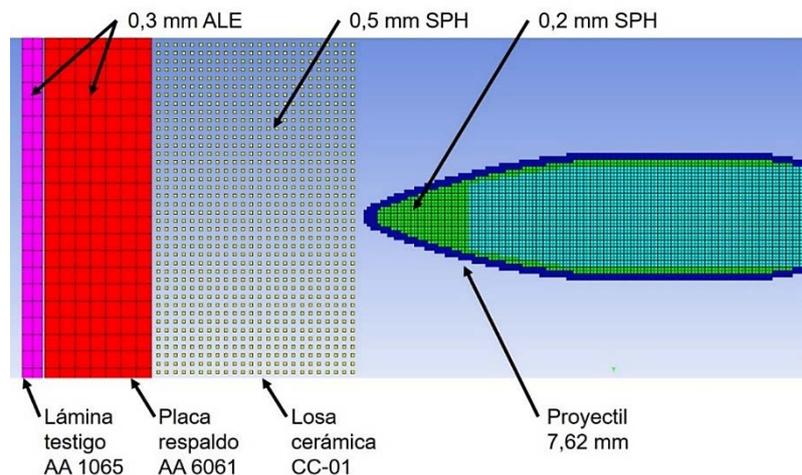


Fig. 2. Ejemplo de la discretización empleada en las simulaciones. Fuente: autores

## 2.3. Selección de los modelos constitutivos

Los modelos constitutivos permiten obtener la tensión  $\sigma$  en función de la deformación  $\epsilon$ , la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$ , la temperatura  $T$ , el daño  $D$ , entre otras variables. El modelo constitutivo Johnson – Cook define la tensión equivalente de Von Mises como tres términos desacoplados donde el primero de ellos define la dependencia del endurecimiento por deformación, el segundo la sensibilidad de la deformación y el tercero la sensibilidad de la temperatura  $T$  [11].

La obtención de las constantes del modelo para cada material se realiza a partir del ajuste de la curva del comportamiento de las tensiones con las velocidades de deformación  $\dot{\epsilon}$  a través de los ensayos de la barra de Hopkinson [7] y el impacto de Taylor, a partir del empleo de códigos de cálculos numéricos aplicados a los ensayos dinámicos.

Actualmente, algunas investigaciones toman los modelos constitutivos Johnson – Cook y los valores iniciales de los parámetros propuestos por los propios autores G. R. Johnson y W. Cook y los ajustan en dependencia de las características y propiedades de cada material; para así lograr una mejor aproximación con las simulaciones numéricas; al ser estos parámetros empíricos analíticos (7).

El modelo constitutivo Johnson – Cook está dirigido al comportamiento de los materiales dúctiles y su tensión de fluencia se expresa mediante la ecuación (1):

$$\sigma = [A + B\epsilon_p^n][1 + C\ln\epsilon_p^*][1 - T_H^m] \quad (1)$$

Donde:

$\epsilon_p$ : deformación plástica efectiva

$\epsilon_p^*$ : velocidad de deformación plástica efectiva normalizada

$T_H$ : temperatura homóloga K, de acuerdo a la ecuación (2)

$$T_H = (T - T_a)/(T_f - T_a) \quad (2)$$

$T$ : temperatura instantánea, K

$T_a$ : temperatura ambiente, K

$T_f$ : temperatura de fusión, K

$A$ : tensión de fluencia inicial, MPa

$B$ : constante de endurecimiento, MPa

$N$ : exponente de endurecimiento,  
 $C$ : constante de la tasa (velocidad) de deformación  
 $M$ : exponente térmico de ablandamiento

Para la placa respaldo de aluminio AA 6061 se seleccionó el modelo constitutivo Johnson – Cook –Takkaffoli. Este modelo fue necesario ajustarle el valor del exponente de endurecimiento  $n$ , ya que el material AA 6061 disponible para la experimentación posee una dureza del 116 %, comparado con los valores registrados en el catálogo *Clinton Aluminum* y el catálogo *Chongqing West Aluminium Metallic Material Co., Ltd.* El valor del exponente de endurecimiento fue ajustado a  $n = 0,06$ .

A la lámina testigo de aluminio AA 1065 se le asignó el modelo constitutivo Johnson – Cook – Tiwari propuesto por la aplicación Ansys/Autodyn para el aluminio AA 1100.

Los modelos constitutivos para los materiales del proyectil 7,62 mm de fabricación URRS/Rusia, fueron seleccionados a partir de la propuesta de L. Carbajal, J. Jovicic y H. Kuhlmann [12]. Al núcleo de acero ASTM 1015 y al encamisado del laminado bimetálico BM, se le asignaron los modelos constitutivos Johnson – Cook. Para el plomo como material de relleno se seleccionó el modelo constitutivo Steinberg – Guinan propuesto por la propia aplicación Ansys/Autodyn.

El modelo Johnson – Holmquist está dirigido a los análisis de materiales frágiles, tales como la cerámica, el granito y el vidrio [13]. Estos materiales son analizados con grandes deformaciones y a altas presiones, basado en el límite elástico y considerando un proceso de fragmentación a través de la variable de daño  $D$  [12, 14]. El límite elástico  $\sigma_i^*$ , se expresa según la ecuación (3):

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^n(1 + C \ln \varepsilon_p^*) \quad (3)$$

La respuesta general del material está dada por el comportamiento inicial del daño y la fractura, según la ecuación (4):

$$\sigma_D^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_F^*) \quad (4)$$

Así como por el límite elástico para el material destruido de la ecuación (5):

$$\sigma_F^* = B(P^*)^m(1 + C \ln \varepsilon_p^*) \quad (5)$$

Donde:

$A$ : constante de endurecimiento

$n$ : exponente de endurecimiento:

$C$ : constante de la velocidad de deformación

$B$ : constante del endurecimiento durante la fractura

$P$ : presión actual, MPa

$m$ : exponente del endurecimiento durante la fractura

$T$ : máxima tensión hidrostática que experimenta el material, MPa

$\sigma_i^*$ : límite elástico para el material íntegro, MPa

$\sigma_F^*$ : límite elástico para el material destruido, MPa

El *Defence Research Establishment*, DRE, actualizó el modelo Johnson – Holmquist – McIntosh para diferentes composiciones de cerámica de alúmina. El modelo es ajustado a partir de la constante del endurecimiento durante la fractura  $B$  en dependencia de las propiedades de cada losa cerámica. Sin embargo, la losa cerámica de alúmina CC-01 no posee un modelo constitutivo que la identifique, siendo uno de sus parámetros distintivos el bajo porcentaje en su composición de alúmina y su baja densidad. Por tal motivo, para realizar las simulaciones del comportamiento de la CC-01, se necesitó de un modelo constitutivo existente de un material frágil, el cual se aproxime a la conducta de los parámetros de la cerámica de alúmina CC-01.

Dadas las características, las propiedades y el comportamiento de la cerámica CC-01, se seleccionó para su análisis el modelo constitutivo Johnson – Holmquist. Al no estar definidos los parámetros del modelo para la cerámica CC-01, se necesitó de una aproximación puntual a partir de los resultados obtenidos durante los ensayos con disparo real.

El parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B$  para el modelo Johnson – Holmquist ha sido propuesto por diferentes autores, los cuales no han coincidido con los valores entre sí. Ejemplo de ellos es el valor  $B = 0,200$  del modelo Johnson – Holmquist para el vidrio, el valor  $B = 0,350$  de la aplicación ANSYS/Autodyn y el parámetro  $B = 0,088$  del modelo Johnson – Holmquist – Grady.

Se analizaron modelos constitutivos Johnson – Holmquist correspondientes a cerámicas de  $Al_2O_3 \geq 95$  % según la aplicación de simulación ANSYS/Autodyn y el modelo Johnson – Holmquist con parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B = 0,280$  [14, 15], así como el modelo Johnson – Holmquist con  $B = 0,310$  para las cerámicas de alúmina  $\geq 99,5$  % [7, 16]. Sin embargo, durante la realización de las experimentaciones

reales en el presente trabajo, el modelo Johnson – Holmquist para el vidrio sódico cálcico sí presentó un comportamiento favorable con una aproximación  $> 92 \%$  para la cerámica CC-01. Su ajuste durante la realización de las simulaciones, permitió alcanzar el valor adecuado para la losa cerámica CC-01, al tener un comportamiento similar al vidrio sódico cálcico empleado como blindaje [17].

### 3. Resultados y Discusión

Se obtuvo una velocidad media de impacto  $v_m = 700 \text{ ms}^{-1}$ . Todas las muestras impidieron la perforación de los proyectiles y se produjo un rebote de sus restos. En cada caso, el rebote del proyectil estuvo acompañado de los fragmentos constituyentes de las dos losas de cerámica CC-01, impidiendo recopilar todas sus partes en el área del campo de tiro.

#### 3.1. Experimentación con disparo real

Como resultado de los impactos con disparo real, en las figuras 4a y 4b se aprecian las dos losas cerámicas CC-01 agrietadas totalmente, provocando una fragmentación generalizada. En el experimento correspondiente a la muestra M41, la placa de aluminio AA 6061 se deformó con un desplazamiento máximo de 1,6 mm y la lámina testigo de aluminio AA 1065 se deformó con un desplazamiento máximo de 4,2 mm. Los proyectiles, en ninguna de las muestras ensayadas, penetraron las placas de aluminio AA 6061.



**Fig. 2.** Ejemplo de ensayo de impacto real del proyectil 7,62 mm en la muestra M41. a) Resultado del impacto, b) Restos de cerámica CC-01 sobre la placa de aluminio AA 6061. Fuente: autores

#### 3.2. Experimentación basada en la simulación con elementos finitos

Para la realización de las simulaciones, se seleccionaron los datos obtenidos durante la experimentación con disparo real en la muestra M41, al alcanzarse el impacto del proyectil próximo al centro de la estructura, figura 3a, a una velocidad inicial  $v_0 = 700 \text{ ms}^{-1}$ . Con el diseño de las simulaciones, se realizaron experimentaciones para converger el parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B$  y lograr la mejor aproximación comparado al resultado con tiro real en la muestra M41, a partir de la iteración de la siguiente relación:

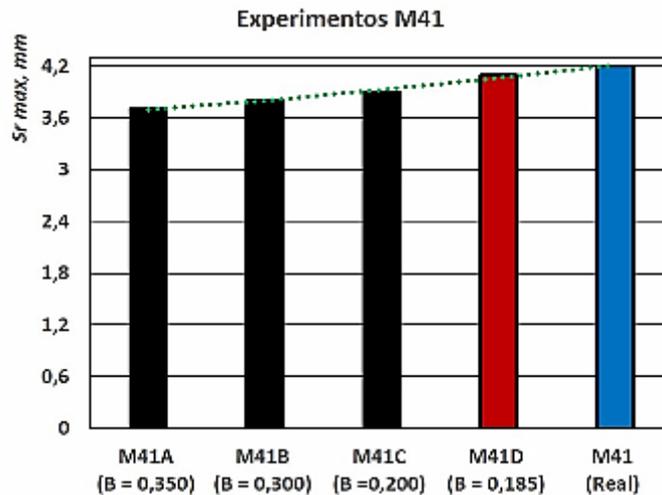
$$0,088 \leq B_{JHV} \leq 0,350$$

El empleo del modelo constitutivo Johnson – Holmquist propuesto por ambos autores para el vidrio sódico cálcico, aportó resultados positivos con el análisis del comportamiento del impacto en la muestra correspondiente a la estructura analizada. Los resultados del tiro real y los resultados de las simulaciones coinciden con la fragmentación de la cerámica, la penetración del proyectil; así como la similitud con los resultados de las experimentaciones en placas antitraumas y losas cerámicas de alúmina impactadas por proyectiles 7,62 mm [6, 18].

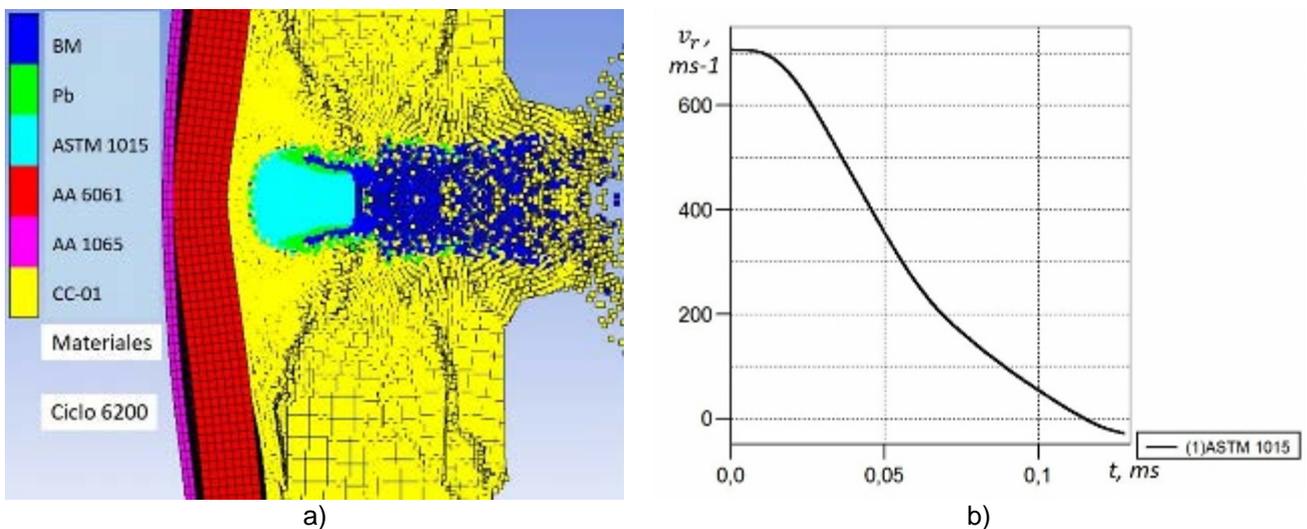
Los resultados de la iteración del parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B$  son resumidos en la tabla 2 y en la gráfica de la figura 4. Las simulaciones con el ajuste  $0,185 \leq B_{JHV} \leq 0,350$  logran retener el proyectil con una aproximación  $> 88 \%$ , destacándose el valor  $B_{JHV} = 0,185$  correspondiente a la simulación M41D como el mejor resultado y una aproximación  $> 97 \%$ . El proyectil se detuvo totalmente con una velocidad de rebote máxima del núcleo del proyectil de acero ASTM 1015  $v_{reb} = -42 \text{ ms}^{-1}$ , un desplazamiento máximo de la lámina testigo  $S_{rAA1065} = 4,1 \text{ mm}$  y la destrucción total de ambas placas de cerámica CC-01, figura 5a y 5b.

**Tabla 2.** Resultados de las simulaciones a partir de la iteración del parámetro de endurecimiento durante la fractura *B*. Fuente: autores

$v_0 = 700 \text{ ms}^{-1}$	AA 1065 (mm)	Error (mm)	Aproximación %
	$(S_{r \text{ max}} = 4,2 \text{ mm})$		
M41A ( $B = 0,350$ )	3,7	0,5	88,1
M41B ( $B = 0,300$ )	3,8	0,4	90,5
M41C ( $B = 0,200$ )	3,9	0,3	92,9
M41D ( $B = 0,185$ )	4,1	0,1	97,6



**Fig. 4.** Gráfico comparativo de los resultados obtenidos con las simulaciones. Fuente: autores



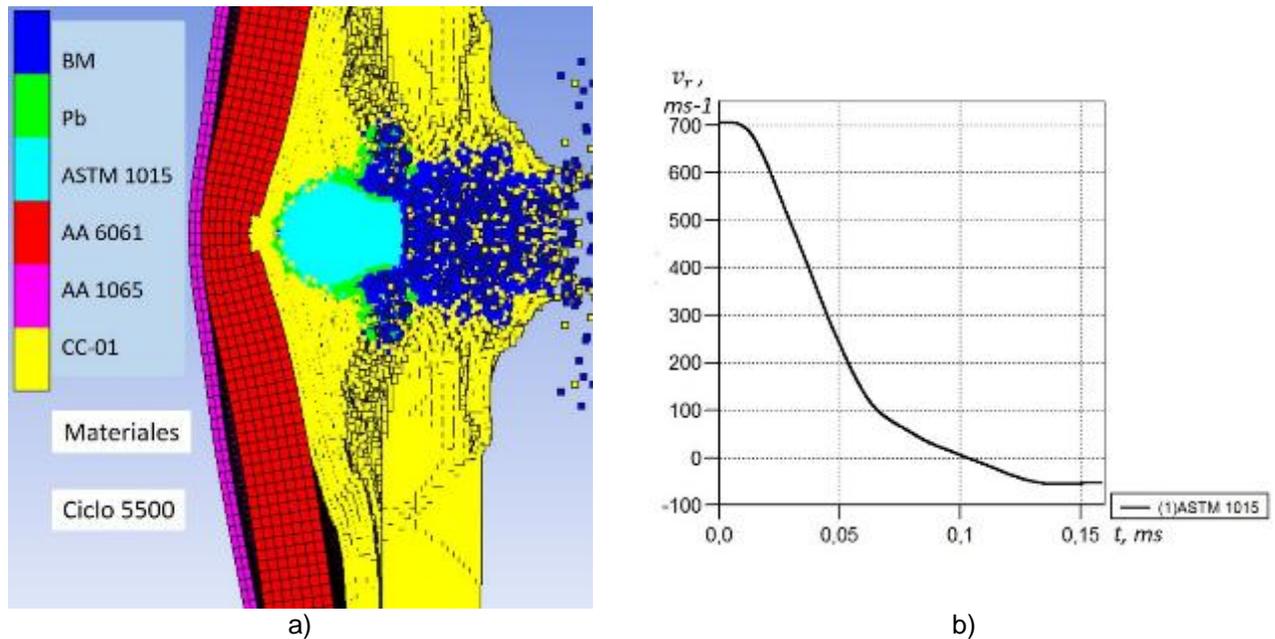
**Fig. 5.** Resultados de la simulación M41D. a) Desplazamiento máximo  $S_{r \text{ max}}$  de la lámina testigo AA 1065 con destrucción total de ambas placas de cerámica CC-01. b) Velocidad resultante  $v_r$  del núcleo del proyectil. Fuente: autores

En la simulación con el empleo del parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B_{JHV} = 0,185$ , se alcanzó la mejor aproximación al ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación real; a partir de que la placa de aluminio AA 6061 no sufrió deformación visible, sin erosión y sólo realizó un ligero pandeo de máximo desplazamiento junto a la placa testigo de aluminio AA 1065. El proyectil alcanzó dentro de la estructura una penetración máxima  $p_{\text{max}} = 26,3 \text{ mm}$ . El resto de las simulaciones con los valores  $B_{JHV} \neq 0,185$  perforaron la estructura o provocaron erosión en la cara frontal de la placa de respaldo de aluminio AA 6061.

### 3.3. Análisis del diseño simplificado de la estructura

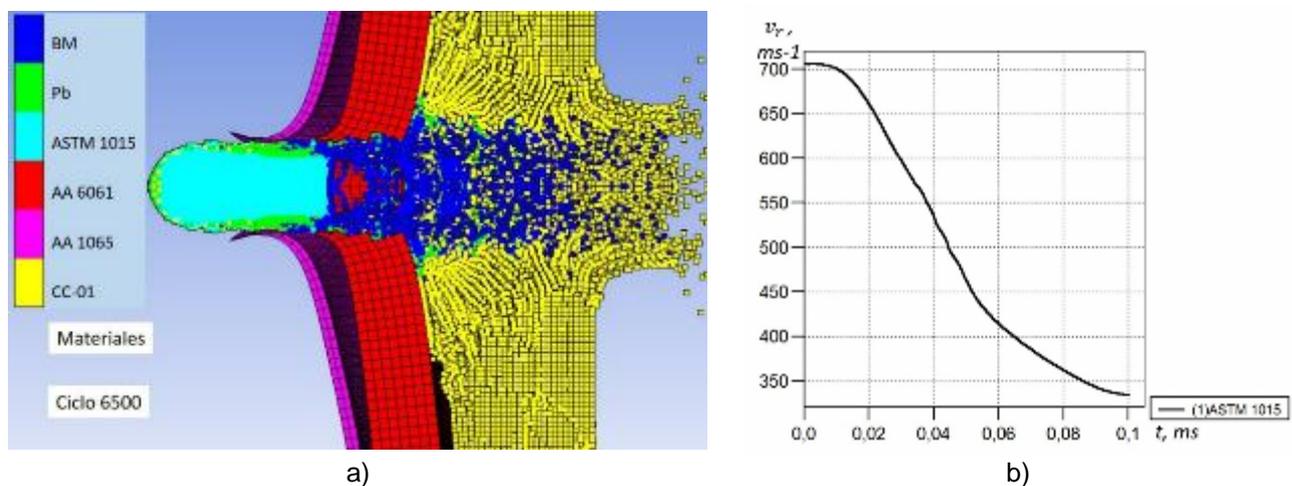
Los resultados obtenidos permitieron la realización de una comprobación del diseño de la estructura blindada, simplificándolo con una sola losa de cerámica CC-01 y manteniendo la placa de aluminio AA 6061. Para ello se realizaron dos variantes de simulaciones: la simulación MSA con  $B_{JHV} = 0,350$  y la simulación MSB con  $B_{JHV} = 0,185$ . Como resultado, se obtuvo la detención errónea del proyectil con  $B_{JHV} = 0,350$ ; provocó un desplazamiento máximo de la lámina testigo  $S_{rAA1065} = 7,0 \text{ mm}$ , la destrucción total de la losa de cerámica CC-01, un erosionado

mínimo en la cara frontal de la placa de aluminio AA 6061 y una velocidad resultante con rebote de los restos del proyectil  $v_{reb} = -54 \text{ ms}^{-1}$ , figura 6a y 6b.



**Fig. 6.** Resultados de la muestra MSA con  $B_{JHV} = 0,350$  y una losa de cerámica CC-01. a) Retención errónea del proyectil. b) Velocidad resultante  $v_r$  del núcleo del proyectil. Fuente: autores

Con relación a la simulación MSB, se obtuvo una perforación en toda la estructura con una velocidad resultante  $v_r > 300 \text{ ms}^{-1}$  del núcleo del proyectil ASTM 1015, figura 7a y figura 7b. Este resultado excluye al parámetro  $B_{JHV} = 0,350$  como positivo y ratifica al parámetro  $B_{JHV} = 0,185$  como valor adecuado para la simulación de la cerámica CC-01 a partir de la adecuación del modelo constitutivo Johnson – Holmquist correspondiente al vidrio sódico cálcico.

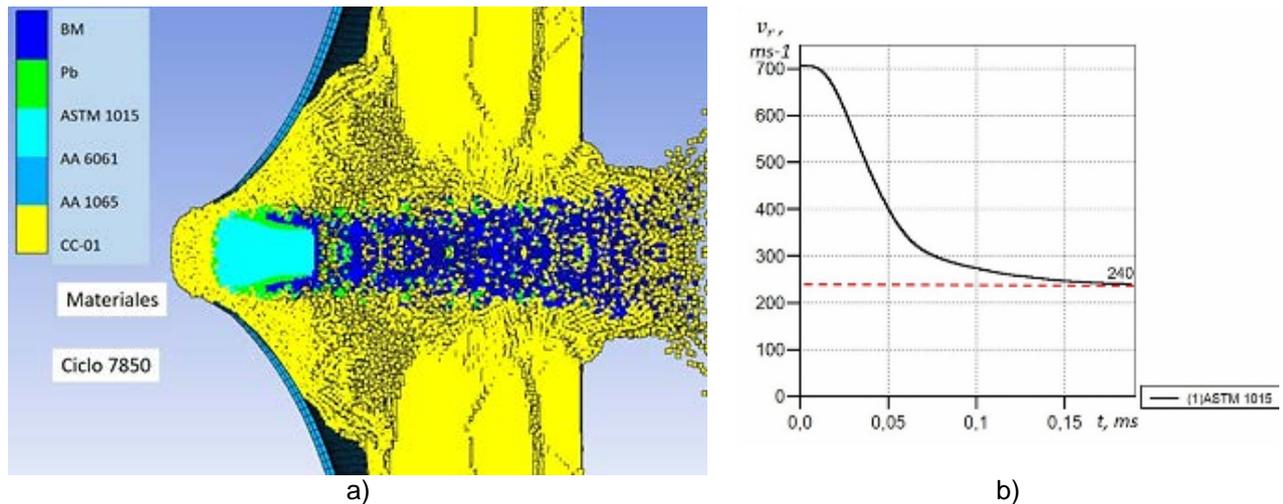


**Fig. 7.** Resultados de la muestra MSB con  $B_{JHV} = 0,185$  y una losa de cerámica CC-01. a) Perforación lógica de la estructura. b) Velocidad resultante  $v_r$  del núcleo del proyectil. Fuente: autores

### 3.4. Análisis del rol desempeñado por la placa de respaldo de aluminio AA 6061

A partir de los resultados anteriores, se realizó la simulación MSC, en la cual la estructura sólo posee dos losas cerámicas CC-01 y la lámina testigo de aluminio AA 1065; sin la presencia de la placa de respaldo de aluminio AA 6061. Finalmente, en la figura 8a y en la figura 8b se aprecia como el proyectil perfora totalmente la lámina testigo a una velocidad resultante  $v_r = 240 \text{ ms}^{-1}$ .

Este resultado reafirma la necesidad de incluir como respaldo, en una estructura formada por dos losas de cerámica CC-01, una placa de aluminio AA 6061 con espesor de 6,35 mm; similar a la placa respaldo empleada en la estructura ensayada con disparo real M4. La pérdida de masa del proyectil y la deformación de la punta ojival, son los factores necesarios que permiten retener al proyectil con una placa respaldo de aluminio AA 6061 de 6,35 mm de espesor.



**Fig. 8.** Resultados de la muestra MSC con  $B_{JHV} = 0,185$ ; dos losas de cerámica CC-01 y sin placa de aluminio AA 6061. a) Perforación de la estructura. b) Velocidad resultante  $v_r$  del núcleo del proyectil. Fuente: autores

## Conclusiones

Fueron obtenidos resultados relevantes permitieron conocer el comportamiento, durante el impacto, del proyectil calibre 7,62 mm disparado por el fusil AKM en la estructura mixta cerámica/aluminio. Las simulaciones basadas en las adecuaciones del parámetro de endurecimiento durante la fractura  $B$  del modelo constitutivo Johnson – Holmquist del vidrio sódico cálcico, determinaron la capacidad de penetración y validaron a las experimentaciones virtuales para disminuir la cantidad de ensayos con disparo real. Se obtuvo un modelo constitutivo alternativo para identificar a la cerámica de alúmina CC-01.

## Referencias

- Pranay V, Panigrahi SK. Numerical Study on the Effect of Spinning for 7.62 APM2 Projectile Impacting on Al 7075-T651 Target. MATEC Web Conf. 2024;393:02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439302001>
- Appleby Thomas GJ, Jaansalu K, Hameed A, Painter J, Shackel J, Rowley J. A comparison of the ballistic behaviour of conventionally sintered and additively manufactured alumina. Defence Technology. 2020;16(2):275-82. DOI: 10.1016/j.dt.2019.06.020.
- Goda I, Girardot J. Numerical modeling and analysis of the ballistic impact response of ceramic/composite targets and the influence of cohesive material parameters. International Journal of Damage Mechanics. 2021;30(7):1079-122. <https://doi.org/10.1177/1056789521992107>
- Moslemi Petrudí A, Vahedi K, Rahmani M, Moslemi Petrudí M. Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target. Frattura ed Integrità Strutturale. 2020;14(54):226-248. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.17.
- Wang X, Yu Y, Zhong K, Jiang Z, Gao G. Effects of impact velocity on the dynamic fragmentation of rigid-brittle projectiles and ceramic composite armors. Lat Am j solids struct. 2021;18(8):e410. DOI: 10.1590/1679-78256701.
- Crouch IG. Body armour – New materials, new systems. Defence Technology. 2019;15(3):241-53. DOI: 10.1016/j.dt.2019.02.002
- Zochowski P, Bajkowski M, Grygoruk R, Magier M, Burian W, Pyka D, et al. Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions. Materials. 2021;15(1):18. <https://doi.org/10.3390/ma15010018>
- Jinnapat A, Doungkom P, Somton K, Dateraksa K. Ballistic performance of composite armor impacted by 7.62 mm armor projectile. J Met Mater Miner. 2023;33(2):120-7. <https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i2.1698>
- Xiao Y, Wu H, Ping X. On the Simulation of Fragmentation During the Process of Ceramic Tile Impacted by Blunt Projectile with SPH Method in LS-DYNA. Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2020; 122(3):923-54. DOI: 10.32604/cmescs.2020.07686
- Meng S, Taddei L, Lebaal N, Roth S. Advances in ballistic penetrating impact simulations on thin structures using Smooth Particles Hydrodynamics: A state of the art. Thin-Walled Structures. 2021; 159:107206. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107206.
- Sastranegara A, Eka Putra K, Halawa E, Sutisna NA, Topa A. Finite Element Analysis on ballistic impact performance of multi-layered bulletproof vest impacted by 9 mm bullet. Sinergi. 2023; 27(1):15. DOI: 10.22441/sinergi.2023.1.003.
- Carbajal L, Jovicic J, Kuhlmann H. Assault Rifle Bullet-Experimental Characterization and Computer (FE) Modeling. In: Experimental and Applied Mechanics. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2011;6:651-668. [Citado 17 de julio de 2024]. Disponible en: [https://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-0222-0\\_77](https://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-0222-0_77)
- Rahbek DB, Johnsen BB. Fragmentation of an armour piercing projectile after impact on composite covered alumina tiles. International Journal of Impact Engineering. 2019;133:103332.
- Guodong G, Shah A, Larry DP. Numerical analysis of ballistic impact performance of two ceramic-based armor structures. Composites Part C: Open Access. 2020;100061. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100061>
- Guodong G, Shah A, Larry DP. Numerical Analysis of Ceramic Mosaic Armor Subjected to Ballistic Impact. International Journal of Composite Materials. 2021;11(1):5-12. DOI: 10.5923/j.comaterials.20211101.02
- Khan MK, Iqbal MA, Bratov V, Morozov NF, Gupta NK. An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target. Thin-Walled Structures. 2020;154:106784. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106784
- Grujicic M, Bell W, Pandurangan B, Cheeseman B, Fountzoulas C, Patel P, et al. The effect of high-pressure densification on ballistic-penetration resistance of a soda-lime glass. Proc. IMechE. 2011;225:298. DOI: 10.1177/1464420711412849
- Çelikkbaş D, Acar E. Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile. Procedia Structural Integrity. 2022; 35:269-78. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.012>

**Editores:**

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Evelio Palomino Marín.  
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

**Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**Contribución de los autores**

**Alexis Ortiz Lahera.** <https://orcid.org/0000-0002-4687-4577>

Participó en la preparación de las muestras ensayadas y en la obtención de datos. Trabajó en el área de diseño y en el procesamiento de los datos recogidos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos, en la revisión crítica de su contenido; así como en la redacción y aprobación del informe final.

**Jaime González Albiza.** <https://orcid.org/0000-0003-1561-0218>

Trabajó en la preparación de las muestras ensayadas y obtención de datos. Trabajó en el procesamiento de los datos recogidos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.