

Este documento es una versión postprint de:

Rodríguez Millán, M., Rubio Díaz, I., Loya Lorenzo, J.A., Moure, M.M. y Miguélez Garrido, H. (2018). Análisis experimental y numérico del material compuesto de aramida frente a impacto balístico. *Anales de Ingeniería Mecánica (Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica): Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (CNIM 2018)*. UNED y AEIM, año 21, v. 1, pp. 1111-1118.

© 2018 Los autores.



Financiación: Ministerio de Economía y Competitividad de España y programa FEDER, Proyecto RTC-2015-3887-8 y proyecto DPI2017-88166-R

Análisis experimental y numérico del material compuesto de aramida frente a impacto balístico

¹ M. Rodríguez Millán¹, I. Rubio Díaz¹, J.A Loya Lorenzo², M.M. Moure¹, H. Miguélez Garrido¹
Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. mrmillan@ing.uc3m.es, mmmoure@pa.uc3m.es,
igrubiod@pa.uc3m.es, mhmiguel@ing.uc3m.es

² Dpto. de Ingeniería Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid.
jloya@ing.uc3m.es

En este trabajo se ha realizado un estudio experimental y numérico del comportamiento mecánico un casco de combate frente a impacto balístico de proyectiles esféricos de 1.7 gramos. Se ha desarrollado un modelo numérico que ha sido calibrado y validado mediante ensayos experimentales en placas de diferente espesor. Un vez validado el modelo, se han desarrollado los ensayos experimentales en el casco de combate. Entre las conclusiones de este trabajo destaca que la localización del impacto en el casco influye notablemente en el límite balístico. Cabe destacar que el modelo numérico es capaz de reproducir cada capa del casco de combate lo cual puede ser beneficioso para llevar a cabo futuras investigaciones sobre el casco con aramida u otro material.

1. Introducción

Debido a la creciente amenaza del terrorismo y participación de las FFCCSS en conflictos nacionales e internacionales, el número de personas con lesiones cerebrales relacionado con amenazas balísticas se ha incrementado. Para minimizar la mortalidad o posibles daños cerebrales irreversibles, resultado de las lesiones en la cabeza por impacto balístico, es de vital importancia asegurar que las protecciones personales, especialmente los cascos de combate, estén diseñadas y fabricadas de la manera más efectiva posible desde el punto de vista de la protección frente a dicho impacto.

La fabricación de los cascos de combate conlleva realizar esfuerzos para reducir su peso sin perder prestaciones de resistencia ante impacto. Este es el principal objetivo de la industria militar. Para el desarrollo de un casco de combate se necesita realizar una gran campaña de ensayos de impacto que conlleva un alto precio de recursos económicos y humanos. La complejidad de los ensayos experimentales justifica el uso de modelos matemáticos que puedan predecir el comportamiento mecánico de los sistemas de protección personal ante impacto balístico. Con estas herramientas numéricas se puede optimizar el diseño de casco ante diferentes amenazas balísticas.

El desarrollo de un casco de combate conlleva cumplir una serie de normas militares en el aspecto balístico. Mediante estas normas se evalúa el casco de combate para determinar tanto la velocidad V50 -velocidad límite a partir de la cual se produce perforación como deformación o trauma en la parte interior del casco. Cabe destacar la norma STANAG 2920 [1] que insta a emplear proyectiles que simulan fragmentos de metralla (FSP o proyectiles esféricos) para obtener la velocidad V50. La norma ampliamente empleada es la NIJ STANDARD 0106.01 [2] que evalúa el trauma producido por un proyectil deformable *Full Metal Jacketed* (FMJ) en una cabeza simulante humana con partes de plastilina balística.

En este trabajo nos hemos centrado en el análisis de la velocidad V50 empleando pequeños proyectiles de geometría esférica. Se realiza una metodología combinada experimental y numérica para alcanzar este objetivo. Son pocos los estudios en la literatura que han combinado ensayos experimentales y simulaciones numéricas [3–5]. Tham y colaboradores [3] llevaron a cabo ensayos experimentales y simulaciones numéricas de impacto balístico en un casco de Kevlar empleando proyectiles esféricos de 11.9 g a 205 m/s. Completaron el estudio analizando numéricamente el comportamiento mecánico del casco frente a proyectiles FSP y FMJ. Tan y colaboradores [4] realizaron ensayos experimentales y simulaciones numéricas de impacto frontal y lateral con un proyectil esférico de 11.9 g a 220 m/s. Recientemente, Rodríguez-Millán y colaboradores [5] analizaron

experimental y numéricamente el comportamiento mecánico del casco de combate desarrollado por una empresa española según las normativas NIJ 0106.01 y STANAG 2920 obteniendo unas buenas predicciones.

Otros investigadores se han centrado en el análisis numérico del casco de combate sin ensayos experimentales debido a la dificultad de realizarlos [6–9]. Van Hoof y colaboradores [6] evaluaron numéricamente la respuesta mecánica frente a impacto balístico de cascos y placas de aramida. Observaron que se producía mayor deformación en el casco que en la placa. Las simulaciones del casco indicaron que el daño producido por el impacto es muy localizado y sus efectos se limitan al área impactada. El movimiento global del casco es despreciable comparado con el de la placa. Lee y Gong [7] desarrollaron simulaciones numéricas para evaluar la eficacia del casco de combate considerando diferentes sistemas de amortiguación interior. Recientemente, Li y colaboradores [8] desarrollaron un modelo numérico para simular el comportamiento balístico del Casco de Combate Avanzado (ACH) para analizar diferentes variables: tamaño del casco, ángulo de impacto, localización del impacto. Concluyeron que a la misma velocidad de impacto de bala, el casco de tamaño pequeño tiene una deformación más significativa y la peor localización para el impacto era frontal. Palta y colaboradores [9] llevaron a cabo simulaciones numéricas sobre el Casco de Combate Avanzado (ACH) empleando proyectiles FSP de 1.1g, FMJ de 9 g y de rifle.223. Encontraron que, aunque el ACH es válido contra impactos de bala de 9 mm, es inadecuado para el impacto de munición de rifle .223.

En este trabajo se han elegido proyectiles esféricos debido a que alrededor de 20 % de las heridas encontradas en los soldados por un explosivo improvisado (IED) es con forma de fragmento esférica y, además, un 70% en el caso de minas o RPGs [10].

El objetivo de este trabajo es el análisis de parámetros como la geometría del objetivo (casco y placa) y la velocidad de impacto que tienen sobre los mecanismos de penetración. Como segunda contribución, se desarrolla un modelo numérico de elementos finitos para predecir la respuesta de un casco de combate sometido a impacto balístico. Una novedad en el modelo numérico del casco de combate es que cada capa de aramida ha sido discretizado con un elemento a través del espesor. El casco de combate consta de más de veinte capas a lo largo de todo el grosor. Generalmente, ha sido modelado sin considerar un elemento por lamina debido al alto coste computacional [4,5,9,11–13].

Para cumplir este objetivo, el documento se ha organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se definirán el material y el equipo experimental empleado. El desarrollo del modelo numérico en placa, que será calibrado y validado con ensayos experimentales con placas planas, se describe en la sección 3. Una vez validado las características fundamentales del modelo numérico en placa, se desarrolla el modelo numérico de impacto en casco de combate que es comparado con ensayos experimentales, sección 4. Además, se realiza un análisis de la influencia de la zona de impacto. Por último, las principales conclusiones del trabajo son expuestas.

2. Metodología experimental

En esta sección se describe la metodología llevada a cabo en los ensayos experimentales para la calibración del modelo numérico.

2.1. Material

El material de las placas utilizadas y del casco de combate está formado por laminas de aramida preimpregnadas de resina y termoconformadas para adquirir rigidez. Las principales características de la aramida compuesta son su resistencia, su excelente capacidad de absorción de energía y su buena relación entre resistencia y peso lo que le hace ser un material muy atractivo para los sectores de defensa y transporte.

Para los ensayos de impacto balístico en placas se han realizado con dos densidades areal distintas 4.43 kg/m² y 8.86 kg/m² en placas de dimensiones de 100×100 mm². Los ensayos en el casco de combate han sido con densidad areal de 8.86 kg/m².

2.2. Dispositivo experimental

Los ensayos experimentales se realizaron con un lazador neumático de calibre 7.62 que es capaz de lanzar proyectiles hasta 6 bares de presión y con una longitud de cañón de 1.5 m. El proyectil utilizado han sido esferas de acero de 1.7 g y 7.5 mm de diametro. El rango de velocidades de impacto utilizado ha sido 350 m/s < V₀ < 850 m/s. En todos los ensayos, los proyectiles después del impacto no han sufrido ninguna deformación, daño o erosión. En la Figura 1, se muestra un esquema con la disposición de los ensayos para el caso de impacto en placa e impacto en casco de combate. En el caso de los ensayos en placa, las probetas fueron apoyadas en su contorno y en dos puntos evitando el deslizamiento durante el impacto. Sin embargo, el casco de combate está sujeto por su zona lateral con un útil orientable que permite realizar impactos en 5 localizaciones diferentes (frontal, laterales, trasera y superior).

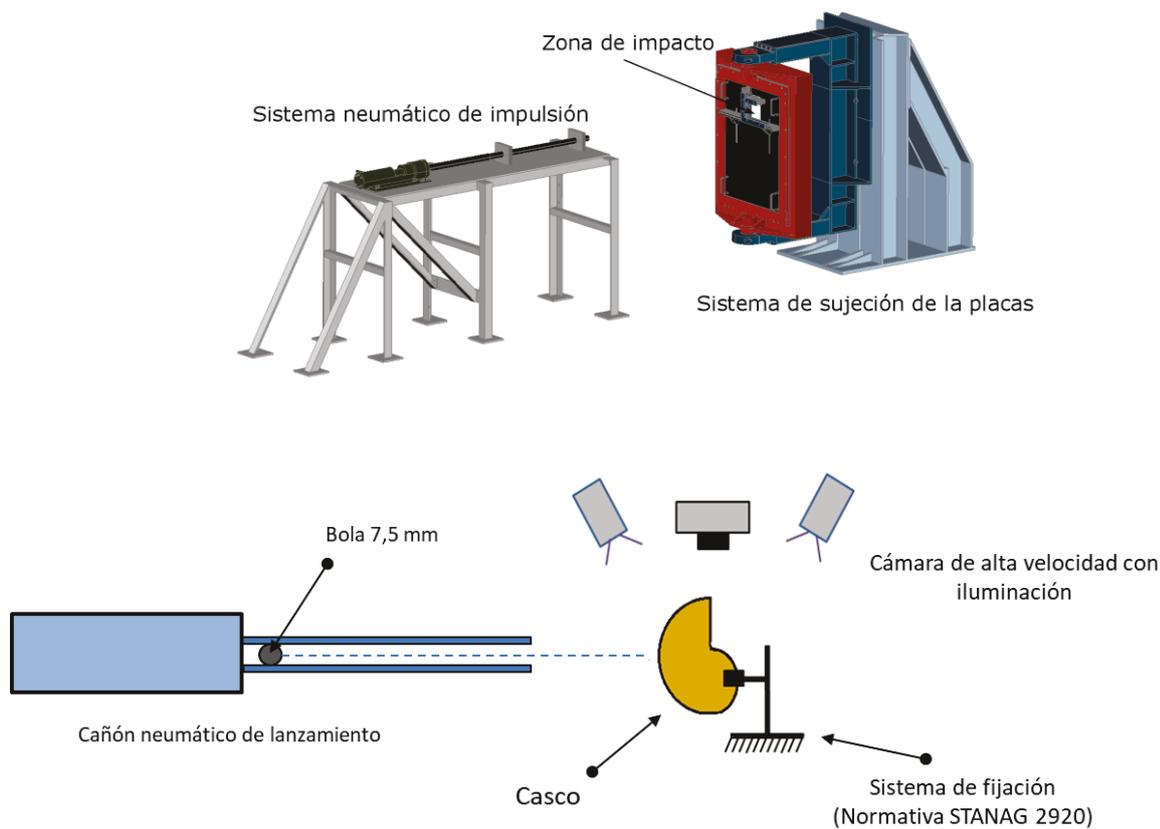


Figura 1: Disposición de la placa y el casco de combate en el equipo experimental empleado.

Se ha utilizado una cámara digital de alta velocidad modelo Photron FastCam SA-Z para grabar la secuencia del impacto y así poder obtener tanto la velocidad de impacto como la velocidad residual en el caso de penetración completa. La cámara ha sido configurada con 28000 fotogramas por segundo (fps) y una resolución de 1024 x 744 píxeles y se colocó de manera perpendicular a la trayectoria de impacto permitiendo capturar tanto la entrada como la salida del proyectil en la misma imagen.

3. Desarrollo del modelo numérico

En esta sección se describe el modelo de elementos finitos empleado para el análisis del comportamiento mecánico de la aramida compuesta ante impacto balístico. El modelo ha sido validado con los datos experimentales.

El modelo ha sido desarrollado en el código comercial de elementos finitos ABAQUS/Explicit utilizando el método lagrangiano. Se han modelado tres sólidos: el proyectil, la estructura de fijación y el objetivo (placa o casco). La geometría del objetivo y de los proyectiles es la misma que la utilizada en los ensayos experimentales.

3.1. Modelo constitutivo para material compuesto de aramida

El casco de combate ACH está fabricado en material compuesto de fibra de aramida, cuyas propiedades mecánicas dependen de la dirección de las fibras. El comportamiento del material se ha considerado elástico lineal hasta el fallo, cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1 [7].

Tabla 1. Propiedades Mecánicas de la fibra de aramida [7]

E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	ρ
(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(-)	(-)	(-)	(kg/m ³)
18.0	18.0	4.5	0.77	2.6	2.6	0.25	0.33	0.33	1230

Es importante tener en cuenta los distintos mecanismos de fallos que pueden darse en este tipo de materiales: fallo interlaminar y fallo intralaminar. Para tener en cuenta estos mecanismos, se ha implementado el criterio de fallo de Hashin mediante una subrutina usuario VUMAT:

- Modos de fallo en el plano

- Fallo en las fibras en dirección 1

$$d_{f1} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1t}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad (1)$$

- Fallo en las fibras en dirección 2

$$d_{f1} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{2t}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \quad (2)$$

- Modos de fallo fuera del plano

- Fallo en las fibras en dirección 3

$$d_3 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_{33}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \quad (3)$$

donde 11, 22 y 33 son las tensiones en dirección longitudinal, transversal y perpendicular al plano de la placa, respectivamente; 12, 23 y 13 son las tensiones de cizallamiento; X1T y X2T son las fuerzas de tracción en las direcciones de urdimbre y trama; S12, S13 y S23 son las fuerzas de cizallamiento transversal. El fallo ocurre cuando cualquier variable de daño (d_i) alcanza el valor 1.

Los valores de los parámetros del criterio de Hashin utilizados (ver Tabla 4) se han obtenido de la literatura científica [7].

Tabla 2. Propiedades resistentes del compuesto de fibra de aramida [7].

X1 _T	X1 _C	X2 _T	X2 _C	X3 _T	X3 _C	S ₁₂	S ₁₃	S ₂₃
(MPa)								
55	555	555	555	1050	1050	77	1060	1086

3.2. Definición del mallado y de las condiciones de contorno.

- Projectil esférico de acero

El proyectil se define como un sólido rígido indeformable ya que en los ensayos experimentales no se apreció ninguna deformación plástica en la superficie del proyectil después del impacto. Esta definición permite reducir el coste computacional de las simulaciones. El proyectil se modeló en acero AISI 4340 y está mallado con elementos C3D8R y un tamaño medio de 0,25 mm (Figura 2a).

- Placas de aramida

La malla de la placa incluye un número total de 395424 nodos y 194160 elementos, véase la Figura 2b. El número de elementos se define a lo largo del espesor en función de la densidad de área de la placa. Cada capa está mallada con elementos C3D8R y con un elemento por capa a través del espesor. La malla se divide en dos zonas diferentes y es refinada en la zona alrededor del área de impacto definida por un cuadrado de 8,5 × 8,5 mm² y con una relación de aspecto de los elementos de 0,81, mientras que fuera de esta región el tamaño del elemento aumenta.

- Casco de Combate

El modelo numérico de casco está modelado con un número total de 539760 nodos y 265728 elementos y cada capa del casco está mallada con elementos C3D8R, con un elemento por capa a través del espesor. Además, la malla está refinada en la zona alrededor del área de impacto definida por un cuadrado de 8,5 × 8,5 mm² con una

relación de aspecto de los elementos de 0,81, mientras que fuera de esta región el tamaño del elemento aumenta. Se han mallado diferentes zonas del casco para reproducir los impactos frontal y superior del casco de combate, Figura 2c.

Para modelar el comportamiento interlaminar, se ha definido una interacción cohesiva entre capas, basada en la ley de tracción-separación en formulación cuadrática. Las tensiones máximas permitidas para la dirección normal (S_n) y tangencial (S_s) son iguales a 34.5 MPa y 9.0 MPa, respectivamente [7]. El contacto entre proyectil y las placas se define mediante una restricción de no penetración y un coeficiente de rozamiento [14]. La opción "hard contact" permite ajustar automáticamente la rigidez, generada por el "penalty contact algorithm", para minimizar la penetración sin afectar negativamente al incremento de tiempo. En cuanto a los efectos de fricción, se supone un coeficiente de fricción dinámica μ igual a 0,33 entre acero y composite.

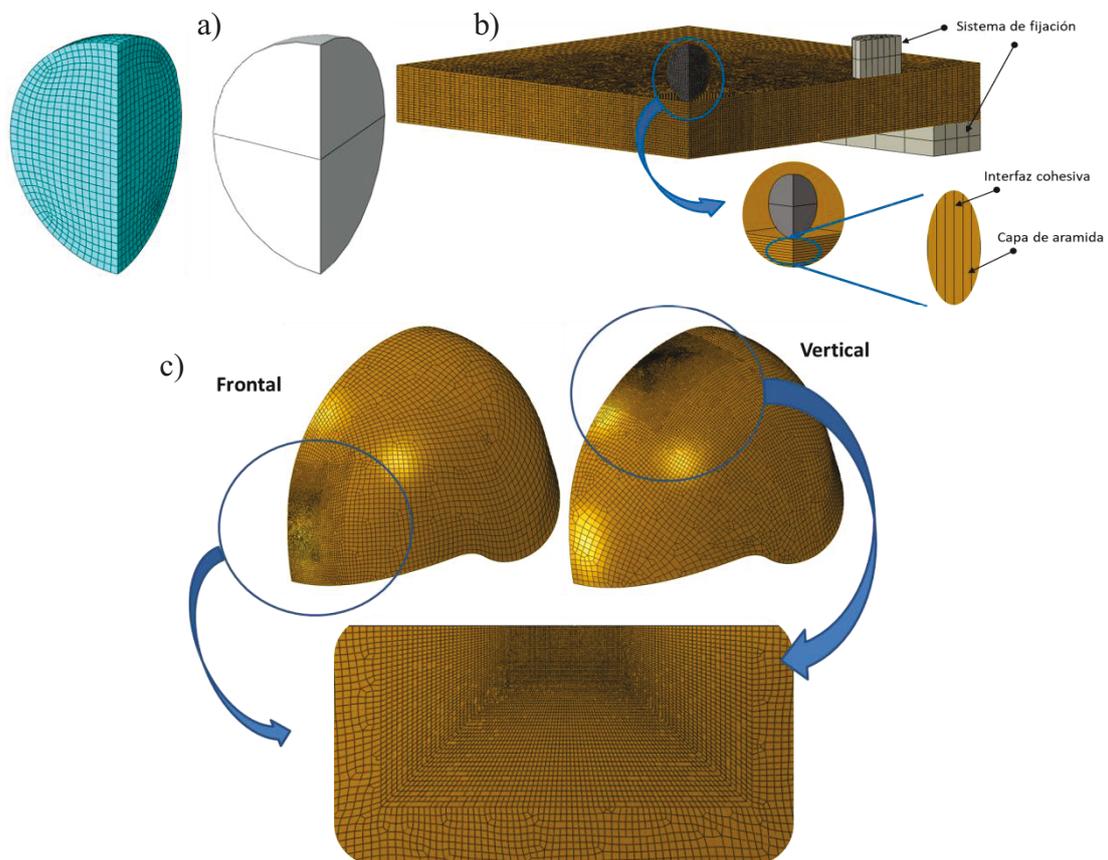


Figura 2: Modelo numérico del proyectil esférico (a), placa (b) y casco de combate (c).

3.3. Validación del modelo numérico con ensayos experimentales

La validación del modelo numérico se realizó con los ensayos realizados en las placas y se evaluó en términos de velocidad residual. El uso de una densidad de malla de un elemento por espesor de capa fue suficiente para predecir con precisión el comportamiento del material.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados experimentales y numéricos con respecto a la velocidad residual frente a la velocidad de impacto para ambas densidades areal, ver Figura 3.

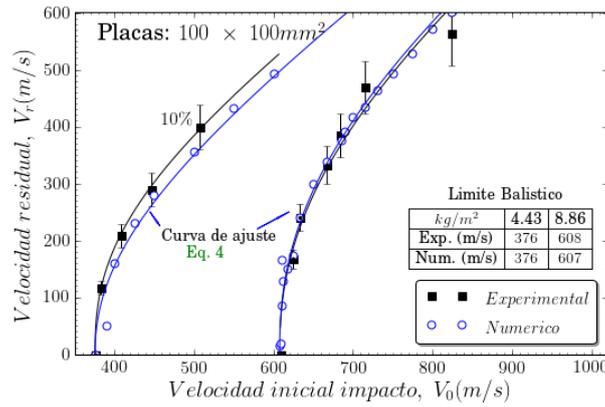


Figura 3: Comparación de la velocidad residual V_r versus la velocidad de impacto V_0 entre los datos de los ensayos experimentales y simulaciones numéricas.

Los resultados que se muestran en la Figura 3 se ajustan mediante la expresión propuesta por Recht e Ipson [15] de la siguiente manera:

$$V_r = (V_0^k - V_{lb}^k)^{1/k} \quad (4)$$

donde κ es un parámetro de ajuste que depende de la forma del proyectil. Los parámetros de ajuste obtenidos son para placas gruesas, $\kappa=2.30$ y $\kappa=2.36$ para datos experimentales y predicciones numéricas, respectivamente, obteniendo un error del 2 %. Los valores de los parámetros de ajuste son ligeramente superiores para la placa delgada. Esto indica que el parámetro de ajuste depende no sólo del proyectil, sino también del espesor objetivo. Los parámetros de ajuste calculados son $\kappa=2.52$ y $\kappa=2.16$ para datos experimentales y predicciones numéricas, respectivamente, obteniendo un error del 16 %.

El modelo proporciona una buena correlación entre los resultados obtenidos numéricamente y los datos experimentales. Una vez validado el modelo en cuanto a velocidad residual, se utiliza para analizar el comportamiento balístico de los cascos de combate.

4. Resultados

Las pruebas experimentales se realizan en dos cascos de combate y un total de 10 disparos (dos por localización) en un rango de velocidades de impacto de 616 m/s a 679 m/s. Todas las pruebas se realizan por encima del límite balístico del material para obtener velocidades residuales. La Figura 4 muestra los resultados experimentales (V_0 - V_r) en función de la localización del impacto.

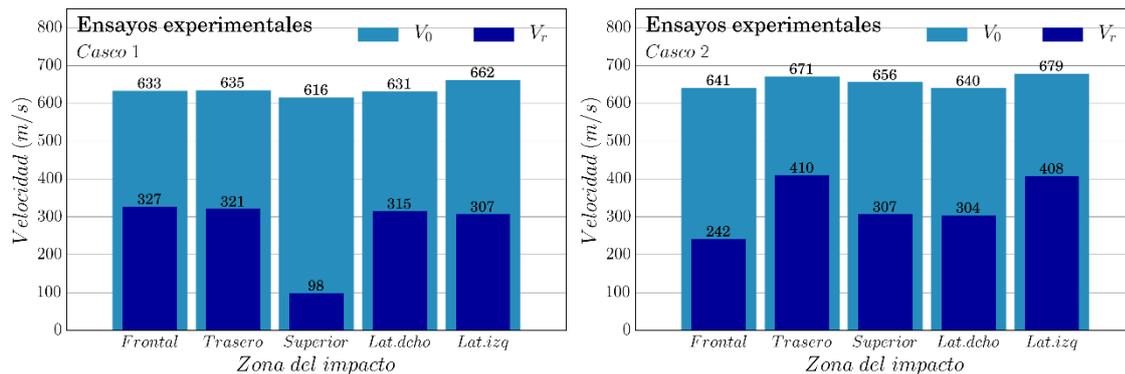


Figura 4: Datos experimentales de las pruebas de impacto en cascos de combate para a) casco 1 y b) casco 2.

Mediante el modelo numérico desarrollado se realizaron simulaciones de impacto balístico en la zona frontal y superior del casco para analizar la influencia de la localización del impacto en el límite balístico así como el valor del parámetro de ajuste, κ , según el modelo de Recht e Ipson (Ecuación 4). Los límites balísticos obtenidos son 533 m/s y 608 m/s para el impacto frontal y superior, respectivamente. Los parámetros de ajuste son $\kappa=2.13$ y $\kappa=2.21$ para el impacto frontal y superior. Para los datos experimentales, se graficaron las barras de error con un 5%.

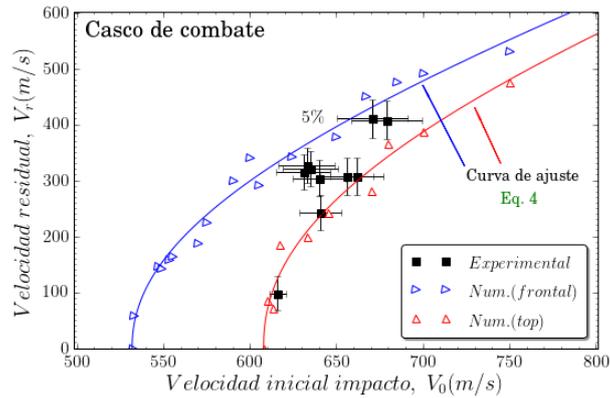


Figura 5: Comparación de la velocidad residual V_r versus la velocidad de impacto V_0 entre experimentos y simulaciones numéricas para impactos frontales y superiores.

La zona de impacto tiene una influencia significativa en el límite balístico. Las simulaciones numéricas revelaron que diferencias del 14% (70 m/s) dependiendo de la zona de impacto. Se requieren valores de velocidad de impacto más altos para los impactos en la parte superior del casco; esto puede deberse a las condiciones de contorno, así como a la geometría del casco en cada localización. Cabe destacar que el impacto frontal se produce aproximadamente a 50 mm del borde libre del casco.

La velocidad de impacto es un parámetro que ha demostrado ser significativo. Para altas velocidades de impacto, por encima del límite balístico, la ubicación del impacto no es de gran importancia; sin embargo, a velocidades de impacto cercanas a los regímenes de no penetración del material, la localización es relevante.

Además, a velocidades cercanas al límite balístico hay una mayor transferencia de energía cinética desde el proyectil al casco que se traduce en mayores deformaciones globales (delaminación). Sin embargo, a velocidades de impacto muy superiores al límite balístico, los efectos son más locales que globales.

5. Conclusiones

En este estudio se ha realizado un análisis balístico mediante simulaciones numéricas y ensayos experimentales para evaluar el comportamiento del casco de combate con proyectiles esféricos de acero de 1,7 g. El modelo numérico ha sido calibrado y validado con ensayos experimentales en placas delgadas y gruesas en términos de velocidad residual. Además, cabe destacar que está diseñado de tal manera que tiene mismas capas que en el modelo real.

Una vez se ha validado el modelo numérico, se han realizado ensayos experimentales y simulaciones numéricas en cascos de combate reales. Los resultados revelaron que la ubicación del impacto puede influir a la hora de determinar el límite balístico.

Por lo tanto, el modelo numérico de casco de combate desarrollado en este estudio, es capaz de reproducir el comportamiento mecánico del casco a impactos de proyectiles esféricos. El desarrollo de una herramienta numérica capaz de reproducir cada capa del casco de combate puede ser beneficioso para llevar a cabo futuras investigaciones sobre el casco con aramida u otro material.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración con la empresa española FECSA por el suministro de los cascos ensayados en este trabajo. Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad de España y al programa FEDER del Proyecto RTC-2015-3887-8 y al Proyecto DPI2017-88166-R por el apoyo financiero de la obra.

6. Referencias

- [1] STANAG 2920 PPS (Edition 2) - Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing. NATO Standardization Agency. 2003.
- [2] NIJ Standard for Ballistic Helmets. Justice NI of USA. 1981
- [3] Tham CY, Tan VBC, Lee HP. "Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations". *International Journal of Impact Engineering*. 35, 304–18. (2008)

- [4] Tan L Bin, Tse KM, Lee HP, Tan VBC, Lim SP. "Performance of an advanced combat helmet with different interior cushioning systems in ballistic impact: Experiments and finite element simulations". *International Journal of Impact Engineering*. 50, 99–112. (2012)
- [5] Rodriguez-Millan M, Ito T, Loya JA, Olmedo A, Miguelez MH. "Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation". *Materials and Design*. 110, 391–403. (2016)
- [6] Hoof J Van, *et al.* "Numerical Head and Composite Helmet models to predict blunt". *19th International Symposium on Ballistic*, 7-11, Interlaken, Switz (2001).
- [7] Lee HP, Gong SW. "Finite element analysis for the evaluation of protective functions of helmets against ballistic impact". *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineerin* 13, 537-550. (2010)
- [8] Li YQ, Li XG, Gao X-L. "Modeling of Advanced Combat Helmet Under Ballistic Impact". *Journal Applied Mechanics* 82, 1-9. (2015).
- [9] Palta E, Fang H, Weggel DC. "Finite element analysis of the Advanced Combat Helmet under various ballistic impacts". *International Journal of Impact Engineering*. 112, 125-43. (2018)
- [10] Barrett, J. "Design validation of future ballistic neck protection through the development of novel injury models". Ph.D. thesis, University of Birmingham, (2015).
- [11] Tan L Bin, Chew FS, Tse KM, Chye Tan VB, Lee HP. "Impact of complex blast waves on the human head: a computational study", *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 1-30, (2014).
- [12] Rodríguez-Millán M, Tan LB, Tse KM, Lee HP, Miguélez MH. "Effect of full helmet systems on human head responses under blast loading". *Materials and Design*, 117, 58-71. (2016).
- [13] Li XG, Gao X-L, Kleiven S. "Behind helmet blunt trauma induced by ballistic impact: a computational model". *International Journal of Impact Engineerin*, 91, 56-67. (2016)
- [14] Systèmes D. Abaqus v6.14 Documentation- ABAQUS Analysis User's Manual ABAQUS. 2014th ed. (2014).
- [15] Recht RF, Ipson TW. "Ballistic Perforation Dynamics". *Journal Applied Mechanics*, 30, 384-390, (1963)