

MODELIZACION ANALITICA DE LA RESPUESTA FRENTE A IMPACTO DE BLINDAJES CERAMICA-ALUMINIO

R. Zaera ⁽¹⁾, V. Sánchez-Gálvez ⁽²⁾

(1) Dpto. de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. C/Butarque 15, 28911-Leganés, Madrid. Tfno: (91) 624 99 20. Fax: (91) 624 94 30.

(2) Dpto. Ciencia de Materiales. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid. Tfno: (91) 336 66 79. Fax: (91) 336 66 80.

Resumen. En los últimos años se ha acentuado en las distintas fuerzas armadas la tendencia a reforzar el blindaje de sus vehículos blindados ligeros. En este sentido han ido cobrando importancia los blindajes "add-on", entre los que destacan por su efectividad los formados por una losa cerámica respaldada por una placa de aluminio. La optimización de este tipo de blindajes puede enfocarse de tres maneras diferentes. La primera de ellas es experimental y presenta el inconveniente de su alto costo siendo por contra la más precisa de las tres. La segunda es la simulación numérica que tiene frente a la anterior las ventajas de su aceptable fiabilidad y de un costo más reducido. Sin embargo, cada cálculo requiere de tiempos de ejecución excesivamente altos. El tercer método consiste en crear un modelo analítico sencillo que permita resolver cada problema en unos pocos segundos en un ordenador personal. Por descontado, la precisión de este último método es menor que la de los dos anteriores, pero permite realizar gran cantidad de cálculos en poco tiempo, ofreciendo una herramienta de gran valor para el diseño. En este artículo se presentan los resultados de un modelo analítico para el análisis balístico de blindajes cerámica-metal sometido al impacto de proyectiles de medio calibre. El modelo ha sido desarrollado a partir de datos obtenidos de pruebas reales de fuego mediante radiografía ultrarrápida.

Abstract. In the last years an increasing interest is observed in the armies of different countries to increase the protection of existing infantry fighting vehicles (IFV) by means of add-on armours. Among the different possibilities to improve the ballistic protection of IFV armours, the utilization of ceramic tiles backed by aluminium plates is being considered as an optimum solution. Design optimization of add-on armours may be carried out by empirical methods, which are obviously the most reliable approaches although they are expensive. It can also be performed by numerical methods, using commercial hydrocodes, but this approach used to be very time consuming. Finally, the third approach is the development of analytical models to simulate the impact phenomenon and obtain solutions of the differential equations by introducing simplifying assumptions. This approach has the advantage of achieving optimised designs in a very short time with the simple help of a PC or even a hand calculator. On the other hand, its validity is limited by the accuracy of the assumptions. This paper presents a new analytical model development to simulate ballistic impact of medium caliber projectiles on ceramic-metal add-on armours. The model has been checked with data of residual mass and residual velocity of real fire tests.

1. INTRODUCCION

La protección de personas, estructuras, armas y vehículos frente a los efectos del impacto de proyectiles ha sido siempre objeto de cuidadoso estudio. La utilidad de determinados sistemas depende fundamentalmente de su habilidad para resistir cargas impulsivas. Aunque es en el campo Militar donde más importancia ha tenido el problema de la protección frente a impacto, también en otras ramas de la Ingeniería existen dispositivos que presentan un serio riesgo de ser dañados por el impacto a alta velocidad de objetos pertenecientes al propio sistema o exteriores a él; el recinto interior de una

separadora centrífuga, la carcasa interior de una turbina de aviación o el casco de una nave aeroespacial son claros ejemplos de componentes estructurales que deben proporcionar una eficiente protección ante eventuales cargas impulsivas para evitar que el daño causado por el impacto afecte al resto del sistema y lo deje fuera de servicio.

Las características del sistema que se pretende proteger influyen decisivamente en el diseño del blindaje. En la protección de obras de fortificación o de edificios, el peso no es un factor determinante en la elección del blindaje. En estos casos es frecuente la utilización de

materiales de bajo costo que permiten compensar con espesores generosos sus pobres o moderadas propiedades resistentes. El uso de sacos de arena en fortificaciones militares o de muros, paneles y losas de hormigón de gran potencia en refugios militares, garitas de vigilancia y cubiertas de reactores nucleares constituyen ejemplos de blindajes en los que su elevado peso no resta eficacia a los sistema que pretenden proteger.

No obstante ésta no es la situación más frecuente con que se encuentra el técnico responsable de diseñar un blindaje. El *peso* es uno de los factores que más importancia tiene en el diseño de la coraza que deberá resistir los impactos, ya que la mayor parte de los sistemas en los que es necesaria la protección frente a cargas impulsivas -vehículos y aeronaves militares y personal de los cuerpos de defensa y seguridad- se caracterizan por ser *móviles*. En este contexto cobra interés el desarrollo de los *blindajes ligeros*, cuya importancia ha ido creciendo acompañada de un considerable incremento en la variedad de materiales utilizados para su fabricación y de los diseños ideados para conseguir una mayor protección.

Con la introducción de los materiales cerámicos en la protección balística desde principios de los años 60 se dió un salto cuantitativo en la disminución del peso de los blindajes. La idea de *unir dos materiales*, uno de elevada dureza situado en la cara exterior de la placa y encargado de "romper" la punta del proyectil y otro de mayor ductilidad situado detrás del primero y capaz de absorber la energía cinética del proyectil por deformación plástica permite reducir hasta un 60 % la densidad areal del blindaje respecto de los aceros utilizados habitualmente en este tipo de aplicaciones (Ogorkiewicz [1]). Así surgen los *blindajes mixtos cerámica-metal*, cuya estructura se muestra en la figura 1.

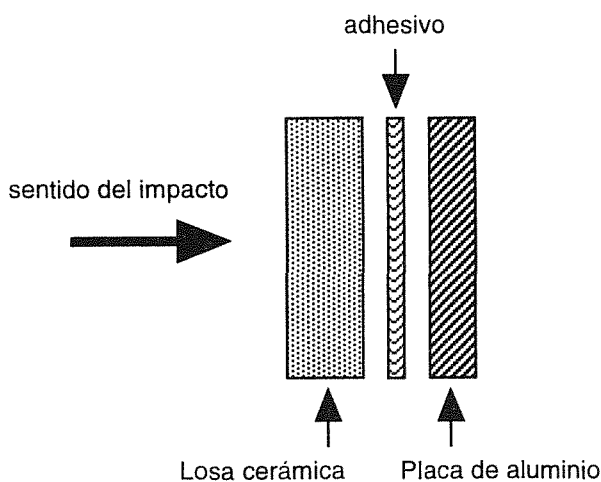


Figura 1. Esquema del blindaje cerámica/aluminio.

Aunque los blindajes cerámica-metal se han utilizado en la protección de cabinas de aviones y helicópteros militares (Ogorkiewicz et al. [2]) su estudio está ligado al desarrollo de los vehículos blindados ligeros. Este tipo de vehículos se ha convertido durante los últimos decenios en un elemento indispensable para los cuerpos de Infantería de los ejércitos occidentales y está diseñado para transportar de 8 a 10 soldados cuya tarea debe ser la de cooperar con los carros de combate en el mismo campo de batalla, por lo que deben disponer de un grado de movilidad y protección similar al de éstos. El blindaje cerámica-metal se dispone sobre el blindaje principal del vehículo -que hace las veces de estructura- en forma de pequeños paneles fácilmente sustituibles en caso de daño.

La amenaza característica de estos vehículos es el proyectil perforante disparado por las ametralladoras pesadas, formados por un núcleo duro de acero o wolframio que alcanza a la salida del cañon velocidades de entre 800 y 1300 m/s; su energía cinética oscila entre los 15.000 y los 150.000 julio. En la figura 2 podemos observar la sección de uno de estos proyectiles perforantes.

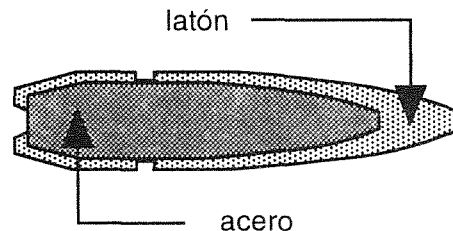


Figura 2. Sección del proyectil 12,70 mm AP OTAN (tamaño real).

2. DISEÑO DE BLINDAJES CERAMICA METAL

El diseño de este tipo de blindajes es una actividad muy compleja para la que se requieren diferentes herramientas de diseño. Entre ellas, los *métodos empíricos* son obviamente los que más seguridad ofrecen y por ello han sido los más utilizados en el pasado, pero presentan la desventaja de ser válidos exclusivamente para el sistema proyectil-blindaje ensayado; cualquier modificación en el sistema requiere la repetición del ensayo. Un acercamiento alternativo consiste en la utilización de *métodos numéricos* -elementos finitos o diferencias finitas-, que permiten simular correctamente el proceso de penetración del proyectil en el blindaje cerámica-metal. Sin embargo, los programas numéricos adecuados para este tipo de simulaciones requieren de las ecuaciones constitutivas a *altas velocidades de deformación* de los materiales involucrados; estas ecuaciones se desconocen en la mayoría de los casos y es necesario introducir una serie de parámetros que deben ser ajustados para la correcta

caracterización del material. Por otra parte, la simulación numérica de un caso de impacto es muy costosa en tiempo, por lo que el número de sistemas proyectil-blindaje analizados no puede ser muy elevado.

Los *métodos analíticos* para la simulación de impactos se muestran como una herramienta de gran utilidad en el diseño de blindajes por su rapidez y sencillez de manejo, además de proveer una detallada información acerca del proceso de penetración. La caracterización de los materiales en estos modelos se suele expresar mediante ecuaciones sencillas y a través de parámetros de fácil determinación experimental tales como el módulo elástico, la resistencia a compresión o la deformación de rotura. Las ecuaciones utilizadas en mecánica se simplifican considerablemente al introducir hipótesis derivadas del análisis del comportamiento global del fenómeno. La principal desventaja de estos métodos respecto de los numéricos es obviamente la menor fidelidad en la aproximación a los resultados experimentales.

Hasta la fecha sólo se han propuesto tres modelos analíticos que simulen el impacto sobre blindajes cerámica-metal (Woodward [3], den Reijer [4], Zaera et al. [5]). Todos estos modelos son unidimensionales y consideran el impacto normal contra una losa de material cerámico respaldada por una placa metálica de un proyectil metálico cilíndrico de características similares a las del 7,62 AP OTAN, munición característica del fusil utilizado durante la última época por los ejércitos del bloque occidental.

El modelo propuesto por los autores del presente artículo permite simular el impacto de proyectiles de mayor calibre y características similares a los disparados por las ametralladoras pesadas. Se contempla también la posibilidad de resolver impactos oblicuos (Fig. 3) mediante la utilización de una Regla de Equivalencia Balística (REB).

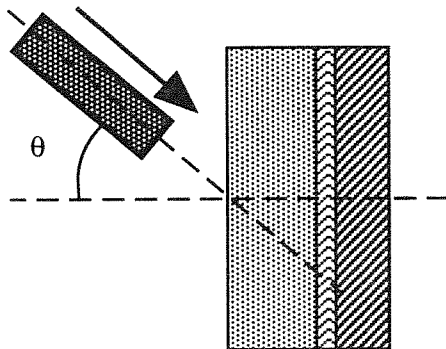


Figura 3. Impacto con θ grados de oblicuidad (según criterio OTAN).

El problema oblicuo se transforma en un problema normal equivalente a través de una serie de conversiones realizadas sobre los distintos parámetros que definen el caso de impacto. Una vez determinado el nuevo problema, se resuelve mediante el modelo analítico disponible para impacto normal.

3. DESCRIPCION DEL MODELO.

Primera fase: fragmentación de la cerámica.

Las radiografías obtenidas durante el impacto del proyectil sobre el blindaje cerámica-aluminio muestran que durante los primeros microsegundos la losa cerámica permanece casi intacta, mientras que la deflexión de la placa de metal es despreciable. La cerámica intacta es muy rígida y por tanto la presión transmitida a la placa es pequeña. Durante esta primera fase se asume en el modelo que la placa de aluminio no sufre deformación alguna. Se adopta la ecuación de Tate [6] y Alekseevski [7] para representar el proceso de penetración en la cerámica intacta:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (v-u)^2 = Y_c + \frac{1}{2} \rho_c u^2 \quad (1)$$

donde Y_p es el límite elástico del proyectil, Y_c la resistencia a compresión de la cerámica confinada, ρ_p y ρ_c las densidades de proyectil y cerámica, v la velocidad del proyectil y u la velocidad de penetración. La ecuación (1) es una corrección de la ecuación de Bernouilli para velocidades de impacto por debajo de los 2 km/s, para las cuales las propiedades resistentes de los materiales deben ser tenidas en cuenta. En un trabajo posterior Tate [8] apuntó la necesidad de tomar para Y_p un valor de $1.7 \sigma_p$, siendo σ_p el límite elástico del proyectil, para conseguir una mejor aproximación a los resultados experimentales.

La resistencia a compresión de la cerámica Y_c se toma como tres veces la resistencia a compresión del material. Hauver et al. [9] han calculado en un reciente trabajo la historia de la resistencia de la cerámica durante la penetración a alta velocidad de proyectiles en blancos de cerámica, obteniendo valores iniciales de entre 5 y 10 GPa para alúmina del 99,5 % de pureza y de entre 5 y 8 GPa para alúmina del 90 % de pureza. Por lo tanto, durante esta fase Y_c es mayor que Y_p para todas las cerámicas avanzadas que se han estudiado y existen dos rangos de velocidades de impacto separadas por una velocidad límite v_{lim} dada por la ecuación (2) por debajo de la cual no existe penetración ($u = 0$). Este es el caso del impacto del proyectil 12,70 mm perforante cuyo núcleo está formado por acero. Para el proyectil 20 mm perforante subcalibrado, cuyo núcleo es de wolframio, v_{lim} es inferior a la velocidad de impacto y la ecuación (1) da una velocidad de penetración positiva.

$$v_{lim} = \sqrt{\frac{2(Y_c - Y_p)}{\rho_p}} \quad (2)$$

Como es sabido, la onda de compresión generada en la cerámica por el impacto viaja a través de la cerámica y al alcanzar el extremo posterior producen una deflexión en la losa cuyo resultado es la aparición de tracciones en sentido circunferencial (Fig. 4). estas tracciones provocan una fisuración radial de la losa cerámica que se va propagando como un frente de fractura a una velocidad muy inferior a la de las ondas elásticas (Hornemann [10]). En este modelo se toma para la propagación del frente la quinta parte de la velocidad de las ondas elásticas en el medio, igual al valor adoptado por otros autores (den Reijer [4]). La primera fase se da por concluida cuando las fisuras radiales alcanzan la punta del proyectil.

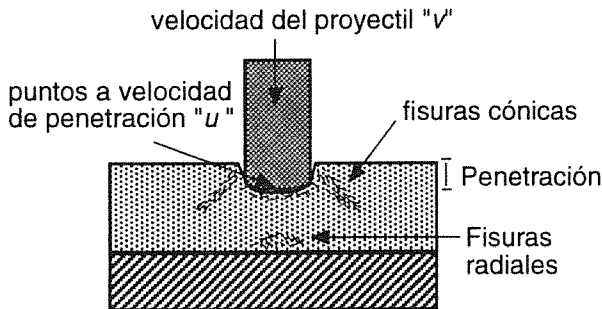


Figura 4. Propagación de las fisuras en la cerámica.

Segunda fase: penetración en la cerámica fracturada.

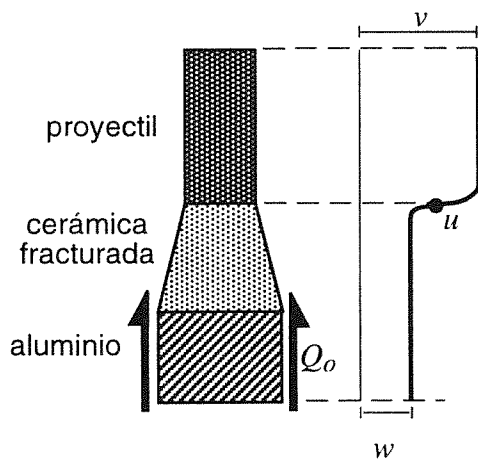


Figura 5. Sistema proyectil-blindaje en la fase 2.

Si siguiendo las ideas del modelo propuesto por den Reijer se asume que durante esta segunda fase la erosión del proyectil continúa mientras que un conoide de material cerámico fracturado comienza a moverse junta con un cilindro de la placa de aluminio. El estudio de pruebas de fuego con proyectiles de medio calibre muestra que

la deformación del blindaje está mucho más concentrada cerca del eje del impacto que en las predicciones del modelo de den Reijer, donde se toma un conoide de 65° de semiángulo en el eje. En el presente modelo se considera que el conoide tiene un ángulo mucho más reducido. En la figura 5 se muestra el conjunto proyectil, conoide de cerámica fracturada y placa metálica; a la derecha del dibujo aparece el campo de velocidades adoptado. La fuerza resistente por unidad de longitud en la placa metálica se considera igual a

$$Q_0 = h_b \tau_{yb} \quad (3)$$

donde τ_{yb} es el límite elástico a cortante del metal y h_b el espesor de la placa. En cuanto a la resistencia a compresión de la cerámica, se toma para esta segunda fase un valor inferior al de la cerámica intacta. Se aplican ecuaciones de variación del momento lineal sobre el proyectil y sobre el conjunto cerámica-aluminio.

La segunda fase concluye cuando finaliza la erosión del proyectil ($v = u$) o cuando la cerámica deja de erosionarse ($u = w$). Igualmente se da por concluida cuando la punta del proyectil contacta con la placa metálica; en este momento, el proyectil "empuja" el tapón de aluminio hacia delante.

Tercera fase: el proyectil empuja el blindaje.

Durante esta fase no existe erosión de proyectil o de cerámica y por lo tanto la discontinuidad de velocidades entre proyectil y blindaje no puede ser resuelta a través de la velocidad de penetración u . Se asume que el proyectil transmite su momento lineal al blindaje a través de una onda que se propaga a velocidad absoluta v . La figura 6 ilustra el perfil de velocidades durante la tercera fase.

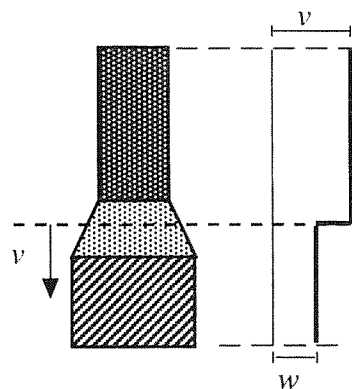


Figura 6. Sistema proyectil-blindaje en la fase 3.

La tercera fase finaliza cuando todo el sistema alcanza la misma velocidad, bien porque v y w se igualan o

porque la onda alcanza la parte posterior de la placa metálica.

4. RESULTADOS.

La validación del modelo se ha realizado comparando los resultados con pruebas de fuego de proyectiles de calibre medio -12,70 AP, 20 APDS, 25 APDS y 30 APDS- sobre paneles de cerámica -se utilizaron tres tipos diferentes, alúmina 95 %, alúmina 99,5 % y nitruro de aluminio- respaldados por aluminio 6082-T6. Durante cada impacto se obtuvieron cuatro radiografías cuyo análisis posterior permitió determinar las velocidades y longitudes residuales de los proyectiles después de atravesar el blindaje. Una descripción más detallada de este dispositivo experimental, diseñado por el Centro de I+D de la empresa Santa Bárbara se puede obtener en la referencia [11].

En las figuras 7 y 8 aparecen comparados los resultados experimentales y analíticos para diversos casos de impacto normal de un proyectil 20 APDS contra blindajes de alúmina 95 % y aluminio. Este proyectil tiene una velocidad a la salida del cañon de 1250 m/s y una longitud de 36 mm. La longitud residual del proyectil viene condicionada fundamentalmente por el espesor de cerámica utilizado en el blindaje ya que es este material el encargado de erosionar la punta del proyectil. En la velocidad residual tiene influencia el espesor total de la placa: la cerámica en cuanto que la reducción de longitud del proyectil favorece la deceleración de éste y el aluminio por ser el material capaz de absorber su energía cinética.

En las figuras 9 y 10 se muestran las velocidades residuales de varios casos de impacto de proyectiles 20 APDS contra blindajes de alúmina 99,5 % y aluminio. La primera corresponde a impactos oblicuos a 50° y la segunda a impactos oblicuos a 60°.

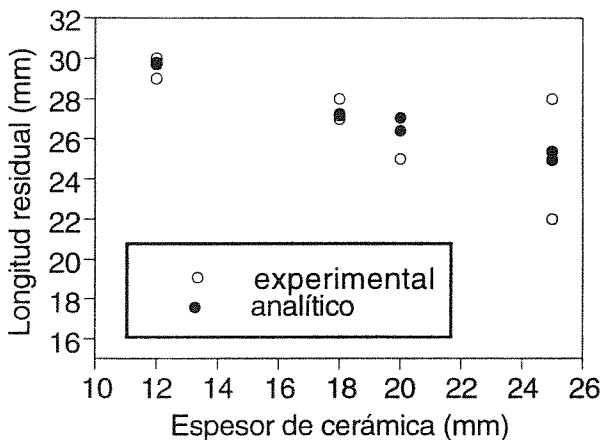


Figura 7. Longitudes residuales para 20 APDS contra blindajes de alúmina 95 % y aluminio 6082.

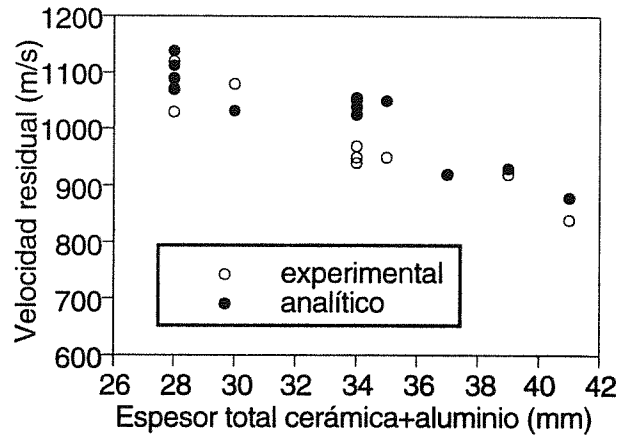


Figura 8. Velocidades residuales para 20 APDS contra blindajes de alúmina 95 % y aluminio 6082.

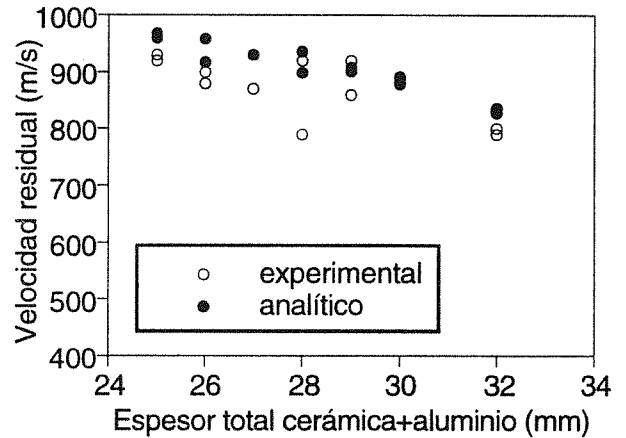


Figura 9. Velocidades residuales para 20 APDS contra blindajes de alúmina 99,5 % y aluminio 6082. Impacto oblicuo a 50° OTAN.

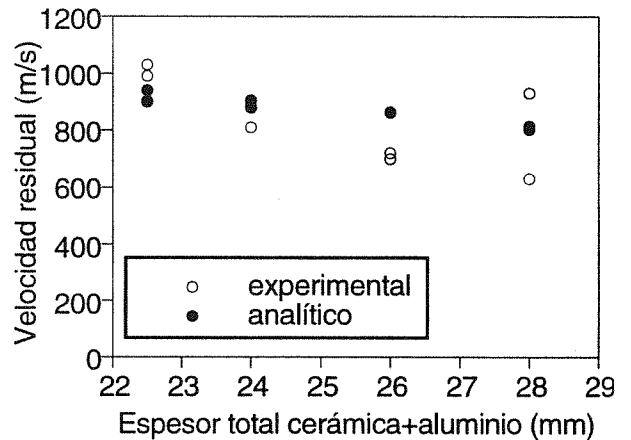


Figura 10. Velocidades residuales para 20 APDS contra blindajes de alúmina 99,5 % y aluminio 6082. Impacto oblicuo a 60° OTAN.

Dentro de la dispersión propia de todo ensayo de estas características, las predicciones del modelo presentado se muestran suficientemente aproximadas, confirmando la validez del modelo para simular el impacto de proyectiles de medio calibre contra blindajes cerámica-aluminio.

5. AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Investigación y Desarrollo de la Empresa Santa Bárbara (Madrid) por la realización de las pruebas de fuego y la obtención de las radiografías.

6. REFERENCIAS.

- [1] Ogorkiewickz R. M., "Development of Lightweight Armour Systems", Proceedings Lightweight Armour System Symposium, Royal Military College of Science, Cranfield (1995).
- [2] Ogorkiewicz R. M., Willis J., "Aluminium Armour for Fighting Vehicles", 1983, Military Technology, Vol. 9, (1983).
- [3] R. L. Woodward, "A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat", Int. Journal Impact Engn., Vol. 9, n° 4, pp. 455-474, (1990).
- [4] P. C. den Reijer, "Impact on Ceramic Faced Armour", Ph. D. Thesis Delft, University of Technology Delft, The Netherlands, (1991).
- [5] Zaera R., Cortés R., Briales C., Martínez M. A., Sánchez-Gálvez V., "Modelo Analítico para la simulación de la Rotura de Blindajes Cerámica-Metal sometidos a Impacto de Proyectiles", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 12, pp 67-72, La Coruña, España, (1995).
- [6] Tate, A. "A theory for the deceleration of long rods after impact". J. Mech. Phys. Solids 15, 387-399 (1967).
- [7] Alekseevski, V.P. "Penetration of a rod into a target at high velocity". Combustion, Explosion and Shock Waves 2, 63-66 (traducción del ruso) Faraday Press, New York (1966).
- [8] Tate A. "Long rod penetration models. Part I and Part II". J. Mech. Sci. 28(9), 535-548 and 599-612 (1986).
- [9] Hauver, G.E., Netherwood, P.H., Benck, R.F., Gooch, W.A., Perciballi, W.J. and Burkins, M.S. "Variation of target resistance during long-rod penetration into ceramics". 13th. Int. Symp. on Ballistics, Estocolmo, Suecia, 257-264 (1992).
- [10] Hornemann et al. "Experimental investigation of wave and fracture propagation in glass slabs loaded by steel cylinders at high impact velocities". 3rd. Conf. of Mech. Properties at High Strain Rates, Oxford, England (1984).
- [11] Briales, C., Cortés, R., Zaera, R., Martínez, M.A. and Sánchez-Gálvez, V. "An experimental and numerical study on the impact of ballistic projectiles onto ceramic/metal armours". 15th. Int. Symp. on Ballistics, Jerusalem, Israel (1995).