

MODELIZACION NUMERICA DE LA FRACTURA POR IMPACTO
EN UN BLINDAJE DE CERAMICA

C. Navarro, R. Cortés, M.A. Martínez, J. Rodríguez y V. Sánchez-Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid.
Ciudad Universitaria s/n, 28040-Madrid

Resumen. Este trabajo aborda el estado actual de la modelización en general, y la numérica en particular, de los procesos de fractura causados por un proyectil cilíndrico que impacta sobre una placa mixta constituida por una de material cerámico sustentada por otra metálica o de composite. Los modelos que se consideran son los denominados analíticos, que abordan el problema haciendo varias hipótesis simplificadoras del mismo, y los puramente numéricos, que precisan de un programa de cálculo lagrangiano basado en el método de las diferencias finitas. Los resultados de la modelización se comparan con los que se obtienen experimentalmente, demostrándose el alto grado de acuerdo existente.

Abstract. In this paper, the latest models to study the fracture processes caused by a cylindrical projectile impacting a layered plate made up of a ceramic material on a metallic or composite backing plate are reviewed. The models are based on an analytical treatment of the problem, involving some simplifying hypotheses, or else they have a purely numeric character calling for implementation into a lagrangian computer code based on the finite differences method. The results achieved by the models used are compared with those obtained from experimental tests, showing the high degree of agreement between them.

1. INTRODUCCION

Desde el primer trabajo de Wilkins [1] sobre el problema de la fractura y comportamiento de un material cerámico sometido a la acción de cargas de impacto, han aparecido numerosos artículos científicos sobre el tema.

No se pretende aquí realizar una exhaustiva descripción de los principales trabajos realizados sino, más bien, mostrar y comentar aquellas herramientas que actualmente posee un ingeniero para abordar este tipo de problemas.

El comportamiento de una placa de material cerámico sometida a impacto es altamente dependiente de la sustentación de la misma. Así, por ejemplo, una placa cerámica de alúmina AD-85 de 11,4 mm de espesor detiene un proyectil que viaja a 95 m/s mientras que, una placa mixta formada por una de alúmina AD-85 de 6,35 mm de espesor sobre otra de aluminio, también del mismo espesor, y por tanto con la misma densidad areal que en el caso anterior, detiene al mismo proyectil viajando a 250 m/s [2]. Es decir, una configuración más económica, logra

aumentar a más del doble el grado de protección frente a una amenaza dada. Esta diferencia de comportamiento es debida a la fragilidad y poca resistencia a tracción de los materiales cerámicos.

Al impactar un proyectil sobre una placa cerámica se produce un pulso de compresión que se propaga a lo largo del espesor. Al alcanzar la cara posterior, el pulso se refleja, convirtiéndose en uno de tracción que comienza a fracturar el material cerámico. El frente de material fracturado se propaga a una velocidad ostensiblemente más pequeña, del orden de la quinta parte [3] en alúmina, que la velocidad de propagación de las ondas de compresión en la cerámica. Tomando un valor de esta última velocidad de unos 8500 m/s y un valor del espesor de alúmina de 10 mm, resulta ser que, transcurridos 7 microsegundos desde el momento del impacto, el material cerámico situado delante del proyectil se encuentra totalmente fracturado. La energía consumida en ese proceso de fractura es muy pequeña en comparación con la que transporta el proyectil [2], no siendo dicho proceso el más importante de entre los que aparecen en este problema. En otras palabras, como la duración del proceso de penetración es de, digamos, 80

microsegundos, la mayor parte del mismo se realiza a través de un material fracturado cuyas propiedades no tienen ya nada que ver con las del material intacto. Es aquí donde el material cerámico juega su papel más importante. En efecto, las partículas angulosas del material cerámico fracturado erosionan al proyectil, "arrancándole" partículas y disminuyendo su momento lineal. La fundamentación física de estos procesos de desgaste está por desarrollar, por lo que, en los modelos, suele suponerse que los procesos de erosión del proyectil y de la cerámica se encuentran gobernados por los flujos plásticos de dichos materiales.

Todo lo anterior explica que, cuando la placa cerámica se encuentra en contacto con otra sustentadora, que coacciona y limita su movimiento y normalmente fabricada de material metálico o compuesto, la eficiencia balística del blindaje mejore tremendamente en comparación con el caso de no existencia de esta última placa.

Tradicionalmente [4], la eficiencia de la cerámica frente a cargas de impacto ha sido relacionada con propiedades mecánicas (Módulo de Young y dureza) y másicas (densidad). Experimentación reciente [5] ha mostrado que dicha eficiencia se incrementa cuando lo hace un parámetro, denominado resistencia efectiva, y que se define como la semisuma del límite elástico Hugoniot y de la resistencia estática, en deformación uniaxial, del material cerámico.

Como es fácil comprender, la modelización del problema resulta bastante complicada, no ya por las lagunas de conocimiento sobre algunos de los procesos que aparecen, sino también por la necesidad de utilizar herramientas no convencionales más o menos sofisticadas. Básicamente existen tres maneras de abordarlo: numérica, analítica y empíricamente. En la primera de ellas, se modelizan los sólidos intervinientes (proyectil y blanco) bien utilizando la técnica de los elementos finitos o la de las diferencias finitas. En general, las herramientas numéricas resultan caras y lentas por el considerable tiempo de ordenador que precisan. Los métodos analíticos, mal llamados así puesto que amenudo precisan de un programa de cálculo implementado en un ordenador, resultan mucho más cómodos de utilizar que los primeros, siendo unas herramientas muy versátiles en las que se pueden incluir nuevos comportamientos de los materiales. La última forma de abordar el problema es la empírica que, como es fácil suponer, tiene un ámbito de aplicación mucho más reducido que las anteriores.

En la presente comunicación se abordan varios ejemplos del problema en cuestión: uno en el que la placa sustrato de la cerámica es metálica y otro en el que dicho sustrato es de material compuesto. Estas configuraciones, conocidas en la práctica como blindajes ligeros, son analizadas mediante diferentes metodologías lo que permitirá extraer una serie de conclusiones.

2. IMPACTO SOBRE CERAMICA/METAL

Uno de los primeros modelos analíticos para este tipo de configuración, y que data de 1969, es el debido a Florence [6]. Recientemente han aparecido en la literatura otros dos modelos debidos a Reijer [7] y Woodward [8]. Aunque estos autores se refieren a sus modelos como analíticos, práctica que es común en muchos de ellos, en realidad son, más bien, modelos ingenieriles puesto que se basan en la resolución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema. Estos modelos son fácilmente programables.

Ambos modelos, en los que el proyectil es considerado cilíndrico y la placa posterior es metálica, utilizan el

teorema del momento lineal y la ley de Newton aplicados tanto al proyectil como al blanco. Suponen que, transcurridos unos pocos microsegundos tras el impacto, un tronco de cono de material cerámico fracturado ha sido formado y consideran que su geometría es conocida. Más concretamente, establecen en unos 65 grados el ángulo que forma la generatriz con la dirección de impacto. Las ecuaciones del movimiento que se plantean se resuelven a lo largo del tiempo utilizando un esquema de diferencias finitas. La placa soporte de la cerámica se supone con una relación constitutiva determinada y su rotura se produce por inestabilidad plástica o por cortante.

A modo de ejemplo, sobre las predicciones de los modelos citados sobre el límite balístico, en la Figura 1 se incluyen los resultados experimentales junto a los obtenidos aplicando los modelos de Florence [6], Reijer [7] y Woodward [8], para una configuración de alúmina AD-85, de dos espesores: 7,9 y 8,6 mm, sustentada por una placa de aluminio 6061-T6, de espesor variable, sobre la que impacta un proyectil de 7,62 mm de calibre con incidencia normal al blanco. Para la utilización del modelo de Florence [6] se ha supuesto una resistencia máxima de 400 MPa y una deformación de rotura del 13%.

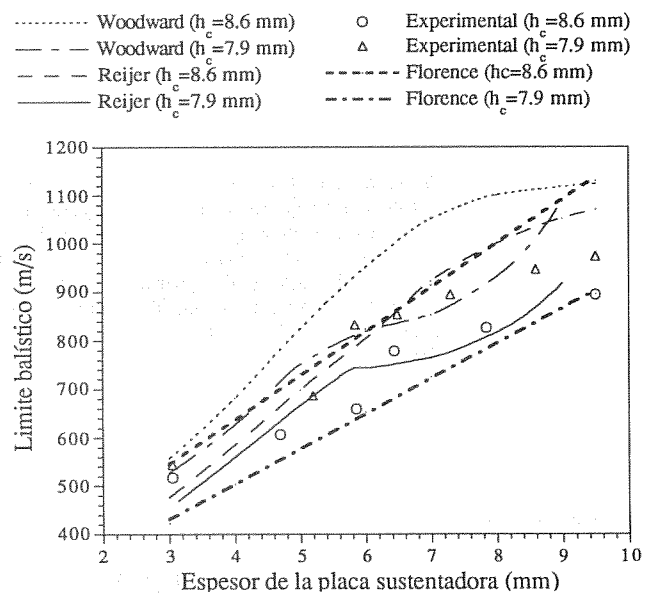


Fig. 1 Resultados de los modelos predictivos de impacto sobre cerámica/metal

La utilización de potentes herramientas numéricas, como es el programa DIMPAC [9], permite la modelización del problema, así como la identificación y seguimiento de los mecanismos de rotura en los materiales intervinientes. Aquí se muestra el caso de un proyectil cilíndrico de acero de 6 mm de diámetro, 31,8 mm de longitud, 7 gramos de masa y que posee un comportamiento similar al del 7,62 mm NATO, que impacta sobre un blanco formado por plaquetas de alúmina (Morgan Matroc Hilox 973) de 8,1 mm de espesor, sustentada por otra de aluminio 6061-T6 de 6 mm de espesor. Las características dinámicas de los materiales intervinientes han sido tomadas de la literatura. Las velocidades del proyectil fueron 815 y 916 m/s, justo por debajo y encima del límite balístico obtenido experimentalmente para ese proyectil y dicha configuración.

La elección de este caso se debe a que se dispone de evidencia experimental [10,11] en la que, mediante una sofisticada técnica de rayos X, se logró determinar las posiciones versus el tiempo, del extremo posterior de la placa de aluminio, de la intercara proyectil/alúmina y del extremo posterior del proyectil.

Tanto para el aluminio como para el acero se supuso un comportamiento elasto-plástico convencional. Para la cerámica se supuso un modelo resistente linealmente dependiente de la presión aplicada. Todos los comportamientos mecánicos anteriores se supusieron independientes de la velocidad de deformación. Un criterio simple de fractura, basado en un valor crítico de la deformación plástica efectiva fue considerado para todos los materiales. En el caso del material cerámico, se permitió que sufriera deformaciones plásticas muy pequeñas, una vez que la resistencia de la cerámica fuera alcanzada, para amortiguar las rápidas fluctuaciones del estado tensional del material que, frecuentemente, se encuentran en este tipo de problemas. Una vez que el material de un elemento está roto, sólo es capaz de sustentar tensiones hidrostáticas. Cuando este elemento se distorsiona excesivamente, el material es retirado (erosionado) y, consecuentemente, es sustituido por un conjunto de puntos máxicos capaces, a su vez, de impactar sobre otras zonas del material.

En la Figura 2 se muestra la configuración inicial del conjunto proyectil-blanco, del que sólo se ha representado la mitad por su carácter axisimétrico, y las configuraciones correspondientes a diferentes tiempos, para una velocidad de impacto de 916 m/s y que es superior al límite balístico. Como puede observarse, al cabo de 6µs el típico cono hertziano, que aparece en estos problemas, de material cerámico fracturado, se ha formado en su totalidad pero, previamente, la forma de dicho material pulverizado era cilíndrica.

En la Figura 3 se muestra la evolución temporal de la posición del extremo posterior del proyectil obtenida del análisis numérico anterior (línea continua) y los medidos experimentalmente (triángulos), para una velocidad de impacto de 916 m/s, que corresponde a un caso de perforación. En la Figura 4 se muestra, para este mismo caso, la evolución temporal de la posición de la intercara proyectil-blanco. Se observa que, dada la dificultad de la técnica de medida empleada, los valores experimentales aparecen muy dispersos, pero la tendencia de los resultados del análisis numérico parece ajustarse a la observada experimentalmente. Las Figuras 5 y 6 representan lo mismo que las Figuras 3 y 4, respectivamente, pero para una velocidad de impacto del proyectil de 815 m/s, velocidad que queda por debajo del límite balístico y que, por lo tanto, corresponde a un caso de detención del proyectil.

3. IMPACTO SOBRE CERAMICA/COMPOSITE

Esta configuración es mucho más difícil de analizar que la anterior, puesto que, si se aborda el problema utilizando modelos propiamente numéricos, éstos tienen que ser tridimensionales lo que obliga a un gran esfuerzo de cálculo.

Desde un punto de vista analítico tampoco se ha tratado el problema, por lo que su estudio constituye una línea de investigación muy novedosa. Recientemente, Hetherington y Rajagopalan [12] han extendido la aplicabilidad del modelo de Florence [6] a la configuración que aquí se trata y que, esquemáticamente se recoge en la figura 7. La expresión que proporciona el límite balístico resulta ser:

$$V_p = \left(\frac{\epsilon S}{0,91 f(a) M_p} \right)^{1/2}$$

donde M_p es la masa del proyectil, a_p su radio, $a = a_p + 2h_1$, h_1 el espesor de la placa cerámica, h_2 el de la placa de composite, S la resistencia a la tracción del material compuesto multiplicada por su espesor, ϵ la deformación de rotura a la tracción del composite, d_1 y d_2 las densidades de la cerámica y del composite, respectivamente y $f(a) = M_p / (M_p + (h_1 d_1 + h_2 d_2) \pi a) \pi a$.

La validez del modelo que Hetherington y Rajagopalan [12] proponen ha sido contrastada con resultados experimentales para un material compuesto a base de fibra de vidrio.

Con objeto de completar dicho contraste, se han considerado en esta comunicación otros dos tipos de materiales compuestos como sustratos para la cerámica: tejido Kevlar 29 con resina poliéster (43-47% del volumen total) y tejido multicapa de polietileno Dyneema SK66.

En la figura 8 se observa la predicción del modelo y los resultados experimentales [2] para el caso del impacto de un proyectil cilíndrico-cónico de calibre 12,7 mm y 30 gramos de masa. Como se observa, a partir de un espesor de la placa de composite de 6 mm, los resultados del modelo están bastante próximos a los experimentales, aunque son algo más optimistas.

En la tabla 1 pueden apreciarse para el caso de un proyectil 7,62 NATO que impacta sobre una placa cerámica de alúmina AD99 de distintos espesores, los valores de las densidades areales necesarias de composite a base de tejido de polietileno, para la detención de dicho proyectil viajando a las velocidades especificadas en dicha tabla.

Tabla 1

Velocidad del proyectil (m/s)	Espesor cerámica (mm)	Densidad superficial composite (kg/m ²)	
		Experimental[13]	Modelo[12]
860	6	13,1	15,55
925	7	10,0	11,90
1000	8	9,2	9,2

Como se observa en esta tabla, las predicciones del modelo son, en este caso, más pesimistas que las obtenidas experimentalmente.

De los dos casos aquí estudiados, puede concluirse que el modelo propuesto por Hetherington y Rajagopalan [12] puede ser utilizado para diferentes tipos de composites, aunque es necesario considerar un coeficiente de seguridad que inicialmente podría estimarse en alrededor de 1,2.

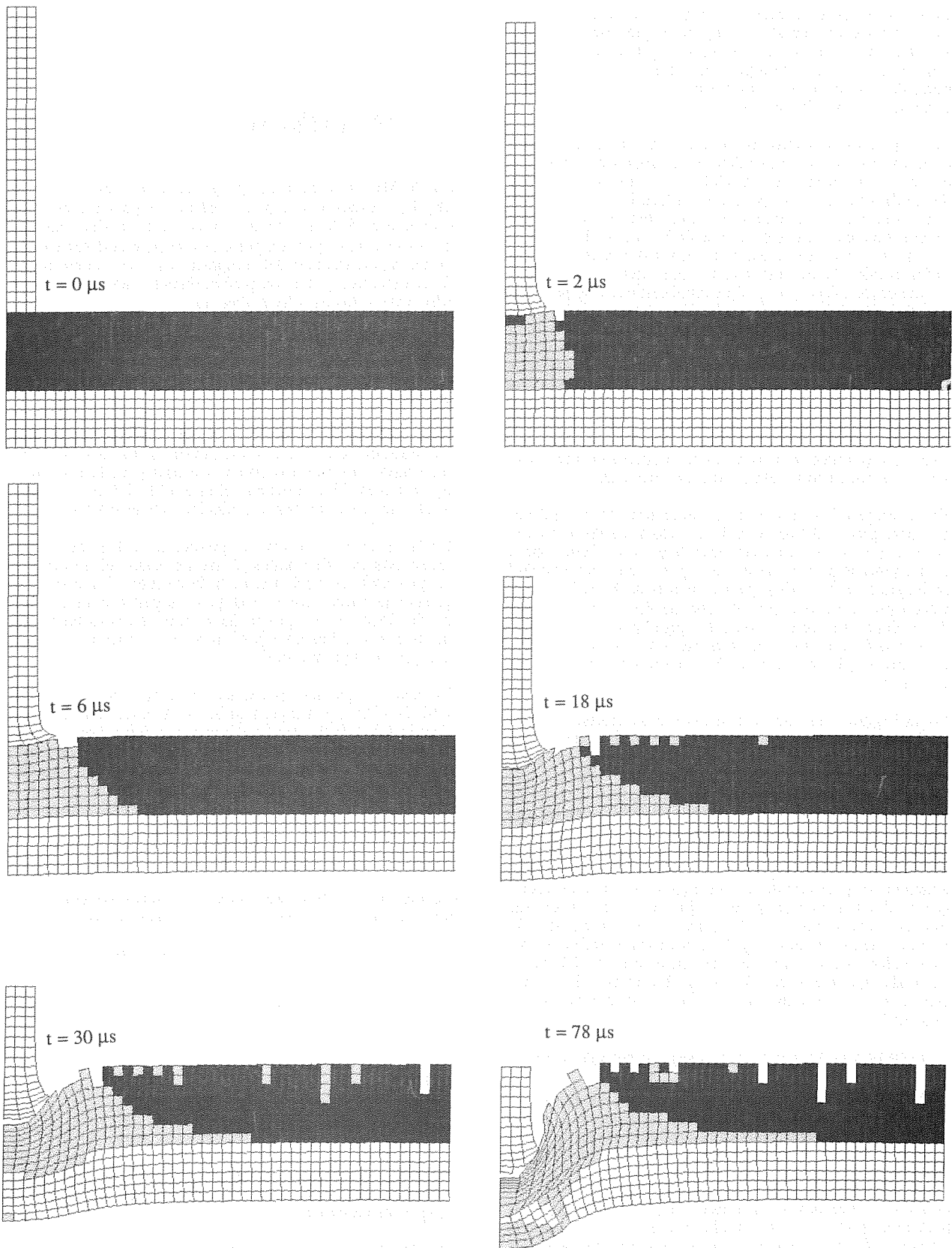


fig. 2 Diferentes configuraciones obtenidas del modelo numérico.

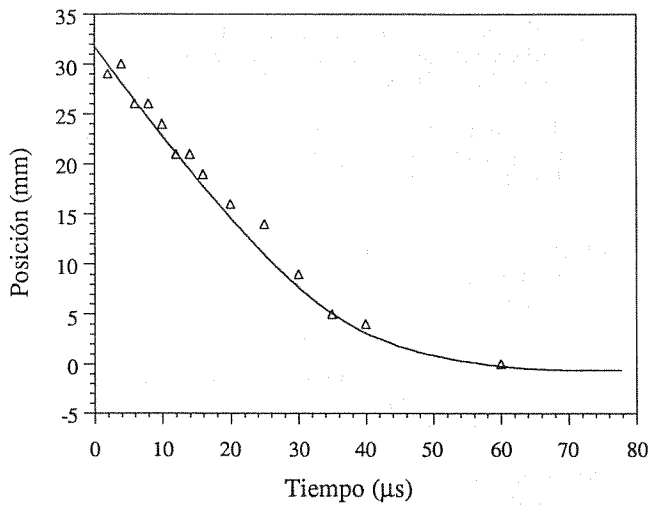


Fig. 3 Posición versus tiempo de la cara posterior del proyectil ($v=916$ m/s)

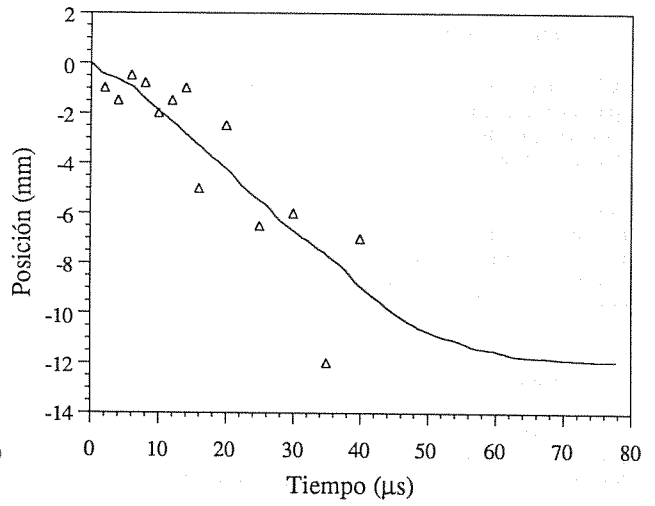


Fig. 4 Posición versus tiempo de la intercara proyectil/cerámica ($v=916$ m/s)

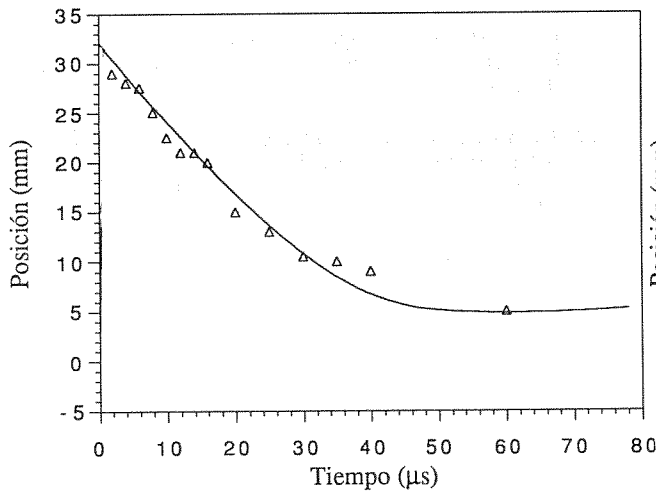


Fig. 5 Posición versus tiempo de la cara posterior del proyectil ($v=815$ m/s)

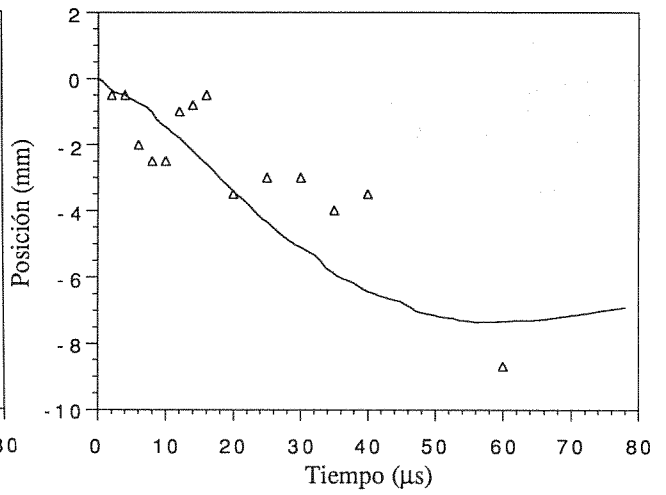


Fig. 6 Posición versus tiempo de la intercara proyectil/cerámica ($v=916$ m/s)

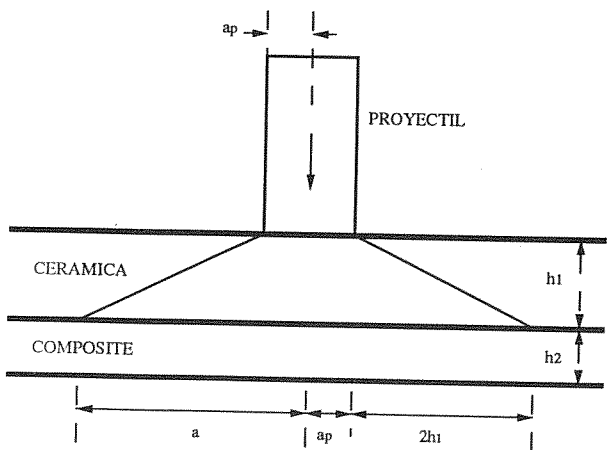


Fig. 7 Configuración inicial

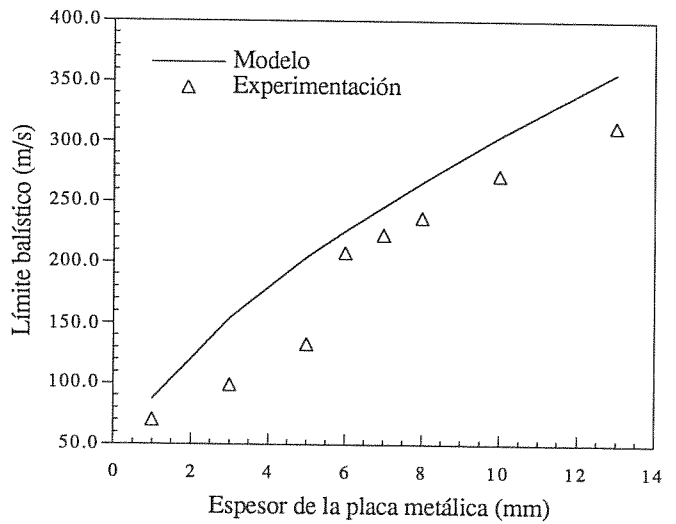


Fig. 8 Impacto proyectil 12.7 sobre placas de AD-85 sustentadas por Composit Kevlar-Poliester de diferentes espesores.

4. CONCLUSIONES

A la vista de todos los análisis realizados puede concluirse que, hoy en día, el ingeniero posee varias herramientas de carácter predictivo para el diseño de blindajes capaces de detener un proyectil dado.

Los denominados modelos analíticos que, más bien debieran denominarse modelos simples ingenieriles, predicen, razonablemente bien, la respuesta de una configuración mixta cerámica/metal o cerámica/composite frente a proyectiles de bajo calibre como los considerados en este trabajo.

Las herramientas puramente numéricas, como el programa DIMPAC [9], utilizado en esta comunicación, predice muy aproximadamente los resultados experimentales observados, lo que ayuda a entender la fenomenología de los procesos de fractura y perforación que aparecen en este tipo de problemas.

5. REFERENCIAS

- [1] Wilkins, M.L., Honodel, C. y Sawle, D., "An approach to the study of light armor", Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, CA, USA, UCRL-50284 (1967).
- [2] Mayselless, M., Goldsmith, W., Virostek, S.P. y Finnegan, S.A., "Impact on Ceramic Targets", J. Applied Mech., **54**, 373-378 (1987).
- [3] Kennedy, C.M., Ofstedahl, K.E. y Mayselless, M., "Analysis of impacts on alumina", FMC Ordnance Division, San José, CA, USA (1986).
- [4] Stiglich, J. J., US Army Rept., AD666766 (1968).
- [5] Rosenberg, Z. y Yeshurun, Y., "The relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles", Int. J. Impact Engng., **7**, 357-362 (1988).
- [6] Florence, A.L., "Interaction of projectiles and composite armour part II", Standford Research Institute, Menlo Park, AMMRG-CR-69-15, California, USA, (1969).
- [7] Reijer, P.C. den, "Further Development of the TNO analytic ceramic faced lightweight armour response model (ALARM)", PML 1990-C17, Prins Maurits Laboratory, Holanda, (1990).
- [8] Woodward, R.L., "A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat", Int. J. Impact Engng., **9**, 455-474 (1990).
- [9] Dpto. Ciencia de Materiales (UPM), "DIMPAC: A computer program for ballistic impact simulation", (1991).
- [10] Reijer, P.C. den, "On the penetration of rods into ceramic faced armours", Proc. 12th Int. Symp. Ballistics, San Antonio, Tejas (1990).
- [11] Reijer, P.C. den, "Impact on Ceramic Faced Armour", Tesis Doctoral, Universidad de Delft, Holanda, Noviembre (1991).
- [12] Hetherington, J.G. y Rajagopalan, "An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours", Int. J. Impact Engng., **11**, 33-40 (1991).
- [13] Catálogo del fabricante (DSM): Dyneema: Lightweight and personal armour.