

ROTURA BAJO IMPACTO DE BLINDAJES MIXTOS POLVO CERAMICO/MATERIAL COMPUESTO

M.R. Vigil y C. Navarro

Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. c/ Butarque nº 15. 28911-Leganés.Madrid.

Resumen. En este trabajo se presentan resultados experimentales relativos al comportamiento, en condiciones de impacto balístico, de un material compuesto sobre el que se ha colocado una capa de unos cuantos milímetros de espesor de polvo fino de cerámica. Tras la descripción fenomenológica de este tipo de problemas, se comentan diferentes aspectos del proceso de penetración, estableciéndose una serie de conclusiones cualitativas que esclarecen el papel del material cerámico en este tipo de protecciones.

Abstract. In this paper, some experimental results about the behaviour, under ballistic impact conditions, of composite materials faced by a layer of ceramic powder several milimeters thick, are presented. After a phenomenological description of the event, relevant aspects of the penetration process are discussed. A set of conclusions show the role of the ceramic material in this kind of protections.

1. INTRODUCCION

Las protecciones contra impacto de proyectiles, realizadas mediante blindajes mixtos a base de losetas cerámicas, de unos cuantos centímetros de lado y algunos milímetros de espesor, pegadas sobre un material compuesto, han demostrado ser muy efectivas para el caso de impacto de proyectiles de bajo calibre (energías cinéticas inferiores a 1000 Julios). En trabajos anteriores se han mostrado resultados experimentales [1,2], y los correspondientes modelos analíticos aplicables [3], para el caso de impacto balístico sobre este tipo de protecciones.

El proceso de penetración de un proyectil en blindajes mixtos cerámica/metal o cerámica/material compuesto puede dividirse en varias etapas, dependiendo de los mecanismos de deformación y rotura de los materiales intervinientes que vayan apareciendo. Experimentalmente, para el caso de losetas cerámicas pegadas sobre placas metálicas, se ha comprobado [4] mediante técnicas de rayos X que, cuando un proyectil impacta sobre el conjunto, existe una primera etapa dentro del proceso de penetración en la que, el material cerámico, impide que la cabeza del proyectil avance en la dirección de impacto. La duración de esta etapa se puede estimar [4] como la

suma del tiempo correspondiente para que, las ondas de compresión generadas en el material cerámico, alcancen la cara posterior de la loseta de cerámica impactada más el tiempo que tardan las fisuras, generadas en la intercara cerámica-metal, en alcanzar la cara frontal de la loseta sobre la que se impactó. A partir de ese instante, se forma un tronco de cono de material cerámico fracturado, que interacciona con el proyectil y que carga directamente sobre la placa metálica, comenzando una nueva etapa del proceso de penetración. En algunos de los modelos analíticos actualmente existentes para este tipo de problemas [5,6,7], no se considera la primera etapa que se ha descrito. Sin embargo, otros modelos [3,4] hacen lo contrario y tienen en cuenta dicha etapa, por lo que resultaría de interés establecer su importancia dentro del proceso de penetración.

Respecto a la duración de la primera etapa en la que, la cabeza del proyectil no avanza, Reijer [4] propone estimarla como seis veces el cociente entre el espesor de la loseta cerámica y la velocidad de propagación de las ondas de compresión en dicho material. Durante esta fase, el proyectil sufre una fuerza de frenado importante (disminución de la velocidad) y comienza su proceso de erosión (pérdida paulatina de masa que se mueve en la dirección y sentido de avance del proyectil), por lo que la

energía disponible para la posterior penetración del blindaje disminuye.

Por otra parte, las protecciones mixtas a base de losetas cerámicas pegadas sobre una placa metálica o de material compuesto, tienen un costo elevado debido, principalmente, al precio de las propias losetas cerámicas. De ahí que se haya pensado en este estudio en sustituir las losetas cerámicas por polvo cerámico, como una posible forma para abaratar costes. En caso de que se optara por dicha sustitución, el proceso de penetración del blindaje carecería de la etapa primera ya que, el tronco de cono de material cerámico fracturado, se encontraría ya formado desde el principio. Si la primera etapa no resultara transcendente, la densidad areal (peso por unidad de superficie) del blindaje resultante para detener un determinado proyectil, sería muy parecida, se utilizara losetas cerámicas o polvo cerámico, mientras que los costes disminuirían drásticamente si se optara por la segunda solución. Un objetivo de este trabajo es evaluar la importancia de la primera etapa, para lo cual se compararan los resultados del impacto de un mismo proyectil sobre dos blindajes, de la misma densidad areal, uno realizado con losetas cerámicas de alúmina sobre un material compuesto, y el otro sustituyendo las losetas por un estrato de polvo de carburo de silicio, con un espesor igual al de dichas losetas. Otro objetivo básico que se persigue en este trabajo es evaluar los cambios de la forma de rotura del laminado, que sustenta al polvo cerámico, respecto a la forma de rotura del mismo cuando el proyectil impacta directamente contra él.

Para estudiar todo lo anterior se han realizado una serie de pruebas reales de fuego sobre blindajes mixtos cerámica/material compuesto en los que, en vez de losetas cerámicas intactas, se ha colocado un estrato de polvo de cerámica con un espesor de 6 mm, similar al que normalmente se usa en blindajes mixtos losetas cerámicas/material compuesto. En este trabajo se muestra un avance de los resultados de la primera fase de ensayos, realizándose una descripción fenomenológica de los mismos que ilustra, esencialmente, la importancia de la primera etapa en el proceso de penetración, y muestra la diferencia entre la forma de rotura del laminado, sobre la que se sitúa el estrato de polvo cerámico, en comparación con el caso en el que el proyectil impactara directamente sobre dicho laminado.

2. METODO, MATERIALES Y PROYECTILES CONSIDERADOS

La experimentación se ha llevado a cabo disparando proyectiles de bajo calibre sobre un blanco formado por un estrato de polvo de cerámica de espesor 6 mm situado sobre un panel compuesto por dos laminados, separados 7 mm entre sí por una cámara de aire, tal como se indica en la figura 1. Posteriormente, una vez retirado el estrato de polvo cerámico, se volvió a disparar sobre el blindaje en otra zona aparentemente no afectada por el impacto previo, lo que permitió evaluar el efecto de la presencia,

o no, de dicho estrato en la forma de rotura del laminado que lo sustentaba. Tras la prueba de fuego se procedió al análisis de los blindajes y a la obtención de los proyectiles deformados. A continuación se proporcionan los datos concretos sobre los materiales y proyectiles utilizados a lo largo de este estudio.

a) Materiales: El material cerámico utilizado ha sido polvo de carburo de silicio de un tamaño de 0,18 mm. Las partículas de cerámica eran angulosas ya que, el material, provenía de machaqueo. Los laminados han sido realizados en nuestro laboratorio utilizando: tejido Dyneema [8], que es un tejido equilibrado a base de fibra de polietileno, preimpregnado de una matriz también de polietileno; láminas unidireccionales (ver UD66 en la referencia [8]) también de fibras de polietileno en matriz de polietileno. Para ambos materiales compuestos, el curado se ha realizado mediante un prensado (25 kg/cm^2) en caliente ($120 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 20 minutos, obteniéndose laminados con diferentes número de láminas y de dimensiones 15×15 centímetros cuadrados. Estas dimensiones vinieron impuestas por la capacidad de carga de la máquina utilizada (8 t) y por la cantidad de tejido disponible. Para todos los laminados que se fabricaron, las fibras tenían, en todas las láminas, la misma orientación.

b) Proyectiles: Se han considerado dos tipos de proyectiles de bajo calibre: el 7,62 mm NATO y el 9 mm Parabellum. El primero tiene una energía cinética típica comprendida en el intervalo 720-750 Julios y el segundo entre 581-700 Julios. Ambos proyectiles tiene un núcleo de plomo confinado dentro de una camisa de latón.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Antes de pasar a describir los resultados obtenidos, conviene dejar constancia de que, en aquellos blindajes sobre los que se realizaron dos disparos -con y sin el estrato de polvo cerámico-, se seleccionó el segundo punto de impacto tras la inspección visual del blanco, escogiendo una zona aparentemente no afectada por el primer impacto. Este proceder no garantiza la inexistencia de una interacción entre los dos disparos, dada las dimensiones de los blindajes, pero en base a los objetivos meramente descriptivos que se pretendían, puede considerarse dicho proceder como adecuado. Los resultados experimentales se recogen en la tabla 1, en la que se describe el tipo de proyectil, de blindaje y los traumas (desplazamientos máximos residuales tras el impacto de la cara posterior de cada laminado del blindaje), para las distintas configuraciones de materiales consideradas. En todas las pruebas, el polvo cerámico empleado, tenía el tamaño anteriormente especificado mientras que, en las pruebas 14 y 15, el tamaño fue de 2 mm. En la figura 2 se observa un proyectil de 9 mm antes y después de impactar directamente contra el laminado (prueba nº 13) sin que existiese el estrato de polvo cerámico previo. En la figura 3 se muestra el

estado final del proyectil correspondiente a la prueba n° 10, en la que el blanco estaba formado por el estrato de polvo de cerámica situado sobre el laminado de tejido Dyneema. En la figura 4 se puede observar el proyectil correspondiente a la prueba n° 15 en la que, la composición del blanco, difería de la correspondiente a la prueba n° 10 en el tamaño de las partículas de cerámica. En la figura 5 se muestra el estado en el que quedó el primer laminado, en el caso de la prueba n° 8, en la que existía el estrato de polvo de cerámica, y de la prueba n° 9, en la que el impacto se producía directamente sobre el laminado. En las figuras 6 (a) y (b) se muestra una ampliación de la foto anterior que permite observar, con un mayor grado de detalle, la rotura del laminado correspondiente a las pruebas n° 8 y 9, respectivamente.

4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Tal como se dijo al inicio de este trabajo, en él sólo se pretende discutir aquellos aspectos fenomenológicos más sobresalientes que aparecen en este tipo de problemas dejando, para fases posteriores del desarrollo de esta investigación, su modelización analítica y numérica.

El primer hecho notable que conviene comentar tiene que ver con la propia filosofía de este tipo de blindaje en lo referente al ahorro que supondría utilizar polvo cerámico en lugar de losetas cerámicas. En la prueba n° 1, la densidad areal del blindaje utilizando polvo cerámico de carburo de silicio, era exactamente la misma que la considerada en los blindajes de los trabajos anteriormente referenciados [1,2], donde el blindaje era capaz de detener un proyectil de 7,62 mm NATO. Sin embargo, el resultado experimental que aquí se obtuvo fue bastante desalentador pues se produjo la perforación del blindaje. Este resultado puso de manifiesto que, la etapa inicial del proceso de perforación que corresponde con la rotura de la loseta de cerámica y la formación de un tronco de cono de cerámica fracturada, juega un papel importantísimo en todo el proceso de perforación. Esta conclusión implica que, si se deseara diseñar un blindaje a base de polvo de cerámica sobre material compuesto habría que ir, previsiblemente, a densidades areales superiores a las correspondientes a los casos de utilizar losetas intactas de cerámica.

El segundo aspecto a resaltar tiene que ver con la deformación y aspecto del proyectil tras el impacto. En todos los casos, el proyectil se achata de una forma característica, apareciendo la camisa de latón unas veces rota y otras no. Cuando impacta directamente sobre el laminado sin que, por tanto, exista el estrato de polvo de cerámica, el centro de curvatura de la superficie del proyectil, que se muestra en la figura 2, queda siempre al mismo lado de la superficie mientras que, cuando existe el estrato de polvo fino de cerámica, la superficie de la punta del proyectil queda hacia dentro (ver figura 3), sin que se produzca la erosión -pérdida de fragmentos- del mismo. En caso de que el tamaño del polvo de cerámica aumentase, el proyectil queda algo erosionado, tal como

se muestra en la figura 4.

El tercer aspecto que se discute concierne al comportamiento y forma de rotura del laminado. En la figura 5, y sus correspondientes ampliaciones de las figuras 6 (a) y (b), en la que se muestran los agujeros en el primer laminado producidos por los impactos de un proyectil de 9 mm, se observa lo siguiente: en el disparo correspondiente a la prueba n° 8 -figura 6 (a)- en la que se colocaba, sobre el laminado que se muestra, un estrato de polvo cerámico, el agujero tiene una forma sensiblemente circular, observándose los restos del polvo de cerámica sobre un círculo concéntrico con el citado agujero. Aparentemente, la anisotropía del laminado no tiene una gran influencia en el proceso de penetración. Sin embargo, en el disparo correspondiente a la prueba n° 9 -figura 6 (b)-, en el que el proyectil impactaba directamente sobre el laminado, la forma del agujero es sensiblemente cuadrada, con lados paralelos a las direcciones de las fibras. Esto sugiere que, la influencia de la anisotropía del laminado es ahora más importante en relación al caso anterior.

Finalmente, la influencia de la presencia del estrato de polvo cerámico en la disminución del trauma residual final, en relación con los valores de dicho parámetro en el caso de que no existiera el citado estrato, puede determinarse a partir de los resultados mostrados en la tabla 1, resultando unos traumas finales entre un 12 % (pruebas n° 5 y 6) y un 44 % (pruebas n° 8 y 9) de los producidos cuando no existe el estrato cerámico.

5. CONCLUSIONES

A pesar del carácter descriptivo de este trabajo, existen un conjunto de conclusiones que pueden establecerse en base a los resultados de las pruebas de fuego que se realizaron. En primer lugar, en el caso de blindajes mixtos cerámica intacta/material compuesto, el tiempo necesario para que se forme en su totalidad el tronco de cono de cerámica fracturada (primera etapa), juega un papel relevante en la eficacia balística del blindaje. En segundo lugar, la forma del proyectil, tras el impacto sobre blindajes realizados a base de polvo de cerámica/material compuesto, presenta una zona central hundida que demuestra el efecto del estrato de polvo cerámico sobre el proyectil. Como cabría esperar en un principio, el efecto de la erosión del proyectil, al impactar sobre el estrato de polvo cerámico, es función del tamaño de las partículas que configuran dicho estrato. Finalmente, también para este mismo tipo de blindajes, la forma de rotura del laminado resulta muy diferente, en comparación con la producida cuando el proyectil impacta directamente sobre dicho laminado.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología por la ayuda MAT94-1242-E, sin la cual no se podría haber

llevado a cabo este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Navarro, C. M.A. Martínez, R. Cortés, J. Rodríguez y V. Sánchez-Gálvez, "Comportamiento de placas mixtas cerámica/composite bajo cargas de impacto", Anales de Mecánica de Fractura, Vol. 10, 1993.

[2] Navarro, C. M.A. Martínez, R. Cortés y V. Sánchez-Gálvez, "Some observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates", Int. J. Impact Engng., Vol. 13, No. 1, 1993.

[3] Navarro, C., R. Zahera, R. Cortés, M.A. Martínez y V. Sánchez-Gálvez, "The response of ceramic faced lightweight armours under projectile impact", Structures under Shock and Impact, Computational Mechanics Publications, 1994.

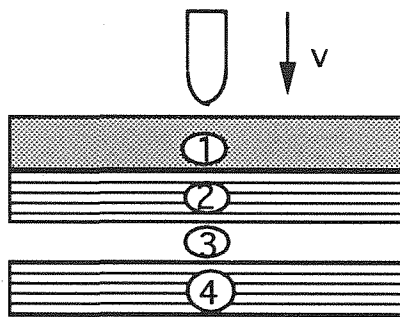
[4] Reijer, P.C., "Impact on Ceramic Faced Armour", Tesis doctoral defendida en la Universidad de Delft en Noviembre de 1991.

[5] Florence, A.L., "Interaction of projectiles and composite armour. Part II", Standford Research Institute, Menlo Park, AMMRG-CR-69-15, California, 1969.

[6] Woodward, R. L., "A simple one-dimensional approach to modelling ceramic faced lightweight armour response model", Int. J. Impact Engng., 9, 1990.

[7] Hetherington, J.G., y Rajaopalan, "An investigation into the energy absorbe during ballistic perforation of composite armours", Int. J. Impact Engng., 11, 1991.

[8] DSM, "Dyneema: Lightweight and Personal Armour". Catálogo del fabricante.



Leyenda:

- 1- polvo cerámico
- 2- laminado
- 3- cámara de aire
- 4- laminado

Figura 1. Disposición del blindaje estudiado

TABLA 1. Resultados experimentales

nº prueba	proyectil		estrato de polvo cerámico	nº láminas		material	trauma (mm)	
	tipo	velocidad (m/s)		en 2	en 4		en 2	en 4
1	7.62	764	si	40	40	tejido dyneema	perforación	
4	9mm	415	si	35	30	lámina UD66	10.7	3.3
5	9mm	407	si	30	25	lámina UD66	13.0	5.6
6	9mm	415	no	30	25	lámina UD66	13.4	6.3
8	9mm	415	si	40	40	tejido dyneema	13.2	2.1
9	9mm	416	no	40	40	tejido dyneema	16.7	4.8
10	9mm	414	si	30	25	tejido dyneema	13.8	7.0
11	9mm	407	no	30	25	tejido dyneema	17.9	10.0
12	9mm	412	si	35	30	tejido dyneema	12.1	5.9
13	9mm	-	no	35	30	tejido dyneema	11.6	7.5
14 (*)	9mm	420	si	30	25	tejido dyneema	15.2	5.6
15 (*)	9mm	420	si	30	25	tejido dyneema	15.7	8.2

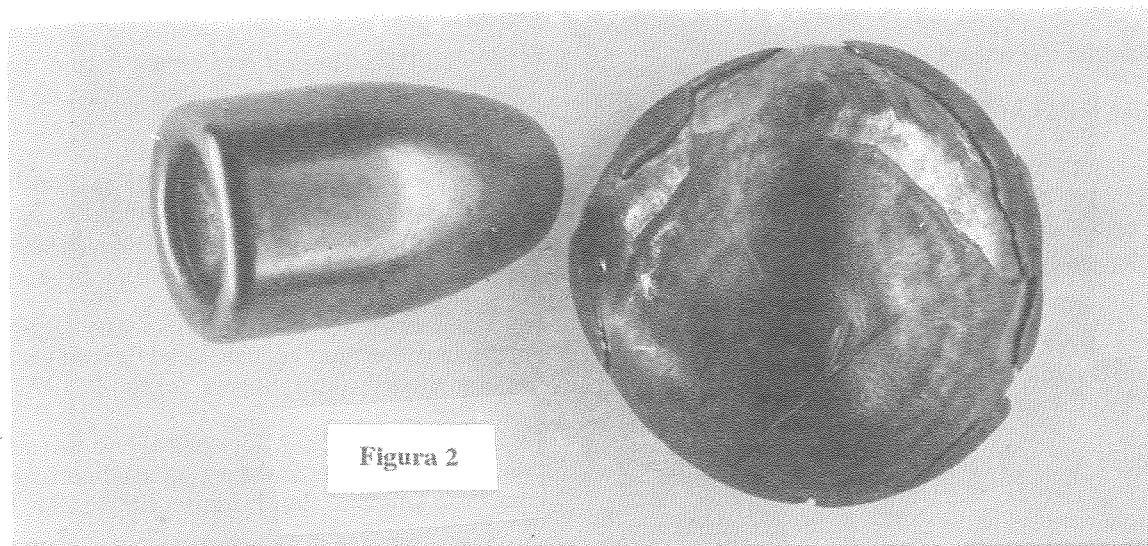


Figura 2

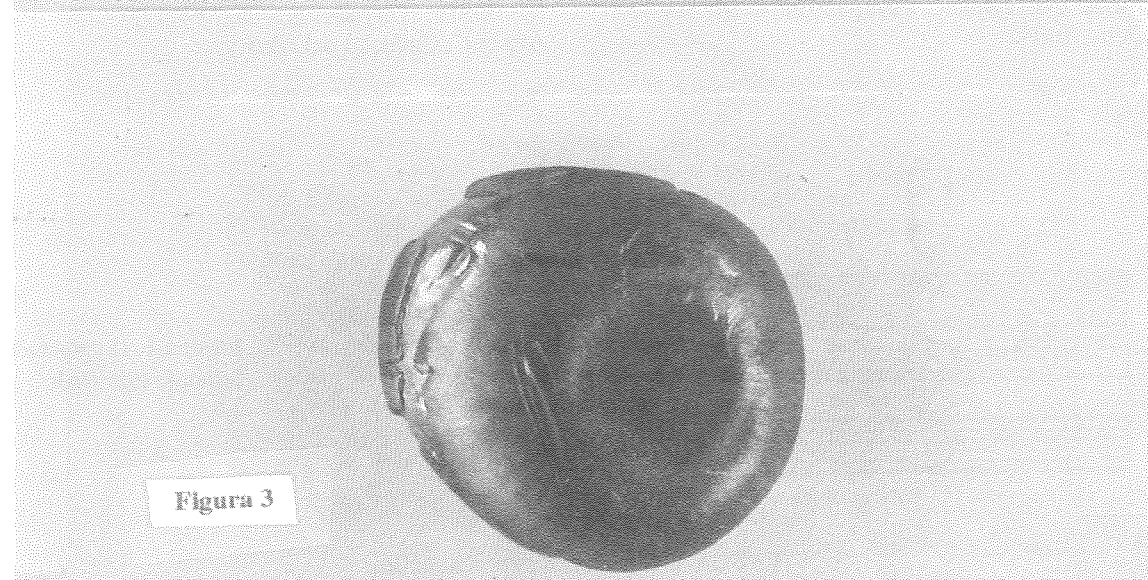


Figura 3



Figura 4



Figura 5

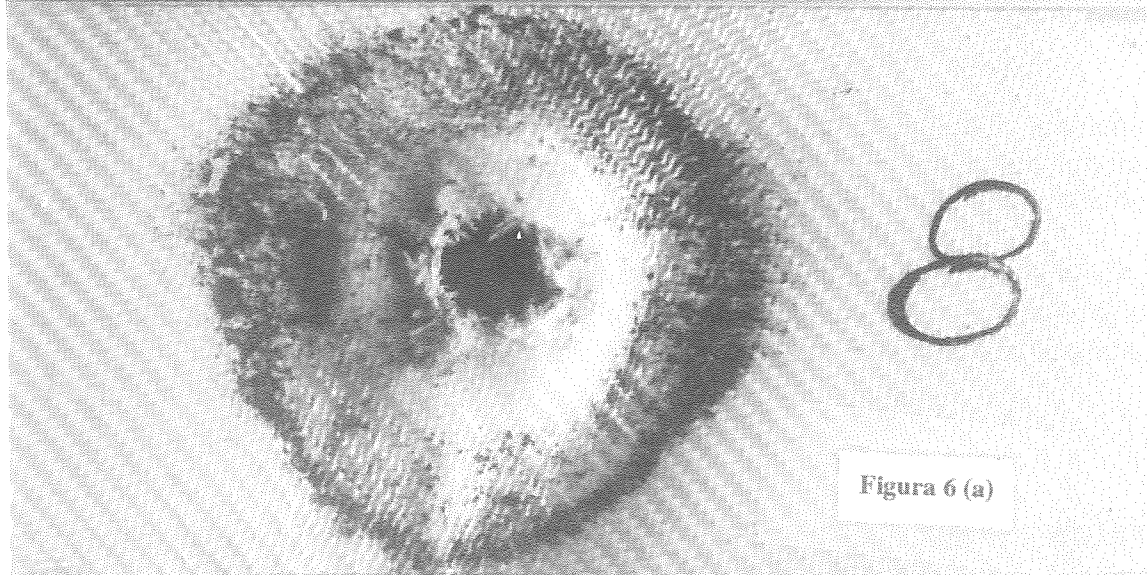


Figura 6 (a)



Figura 6 (b)