

MODELIZACION DE LOS PROBLEMAS DE IMPACTO

antes
C. Navarro

Departamento de Ciencia de Materiales. Escuela de Ingenieros de Caminos.
Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-Madrid.

Resumen. Este trabajo resume el estado de los conocimientos sobre los diferentes tipos de modelización para el análisis de los problemas de impacto a alta y baja velocidad, agrupándolos según posean un carácter empírico, analítico o numérico. Posteriormente se presentan tres análisis numéricos correspondientes a velocidades de impacto comprendidas entre 405 y 1885 m/s que muestran las posibilidades que dichos métodos ofrecen.

Abstract. A resume of the state of the art on the different models used in the analysis of high and low velocity impact problems is presented in this paper. The models are grouped into empirical, analytical and numerical ones, depending on the way they were developed. In addition, numerical analyses of three different problems, with impact velocities ranging from 405-1885 m/s, are described in order to show the possibilities of the numerical methods.

1. INTRODUCCION

La industria militar, junto a la aeroespacial, han propiciado el rápido desarrollo de una nueva disciplina que se conoce bajo el nombre de Mecánica del Impacto. En ella, están incluidos todos aquellos problemas ingenieriles en los que intervienen dos, o más, sólidos que interaccionan entre sí durante un intervalo de tiempo muy pequeño. Esta interacción engloba los siguientes problemas: a) los simples choques entre sólidos, en los que los comportamientos de los materiales intervinientes permanecen dentro de los regímenes elástico o elasto-plástico; b) los de penetración de un cuerpo sobre otro, denominados en lo que sigue proyectil y blanco, respectivamente; c) y, por último, las acciones de ondas, causadas por explosiones, sobre elementos estructurales.

Aunque existen en la actualidad varios libros, y numerosos artículos científicos, sólo está bien entendido una pequeña parcela del campo citado. De hecho, en la década pasada, han empezado a aparecer las primeras asociaciones científicas de ámbito europeo (Impact Club y DYMAT), una revista especializada (International Journal of Impact Engineering) y otra de muy próxima aparición (Journal of DYMAT), y una serie de congresos y simposios internacionales que se

repite con periodicidad (Ballistics Symposium, Int. Conf. on Structures under Shock and Impact (SUSI) y DYMAT Conference).

Los problemas que se analizan en este campo revisten interés para casi todas las ingenierías. Así, a modo de ejemplo, pueden citarse los problemas derivados de los choques de estructuras de autolocomoción, tales como coches, barcos, trenes, etc., los choques entre estructuras próximas cuando se ven sometidas a acciones sísmicas, los impactos balísticos de un proyectil, una carga hueca, etc., las acciones de explosiones sobre las estructuras colindantes, el impacto de meteoritos sobre estructuras aeroespaciales, etc..

Probablemente, el hecho que se desprende del párrafo anterior, que de alguna manera muestra el carácter multidisciplinar de la materia, ha sido la causa, junto a la de su novedad, de que ésta no pueda ser considerada patrimonio de una ingeniería concreta y que, por lo tanto, haya quedado algo arrinconada dentro de la formación que se proporciona en la actualidad a nuestros físicos e ingenieros.

Paralelamente a lo anterior, y dado que en los problemas citados los materiales intervinientes son solicitados a altas deformaciones que, en algunos casos, pueden llegar

*estructural
materiales*

hasta la rotura, en unos intervalos de tiempo muy pequeños -del orden de la diez milésima de segundo-, las velocidades de deformación que se alcanzan son de unos cuantos miles de s^{-1} . Esto obliga al conocimiento de las relaciones constitutivas de los materiales a altas velocidades de deformación, para lo que hay que recurrir a dispositivos experimentales del tipo de la barra Hopkinson que, aunque de un funcionamiento conceptual muy simple, obliga a desarrollar métodos de medida muy precisos y sofisticados. Lo anterior significa que, a la vez que se progresa en el conocimiento de la Mecánica del Impacto, conviene también hacerlo en el campo de la caracterización dinámica de materiales a altas velocidades de deformación.

Centrándonos ya más en el objeto de lo que aquí se presenta, nos circunscribiremos al problema de impacto en el que un sólido penetra, deteniéndose o atravesando, otro sólido. Este es el caso de lo que antes se denominó impacto balístico aunque, como resulta fácilmente comprensible, los desarrollos que aquí se presentarán poseen una utilidad que no los limita sólo a ese tipo de problemas. Sin embargo, el objetivo de las técnicas que se aplican presentan un punto común: se trata de detener un determinado proyectil utilizando una protección a definir, tanto en geometría como en los materiales a utilizar, y que resulte eficaz, liviana y barata.

El tratamiento y análisis del problema señalado puede llevarse a cabo mediante un procedimiento experimental: pruebas y ensayos a escala real en los que se lanza un proyectil previamente conocido, contra un blanco que, de prueba en prueba, va cambiando su configuración geométrica y material. Como puede entenderse, este método de diseño resulta muy costoso y no garantiza que se haya obtenido la solución más óptima, ni desde el punto de vista de definición geométrica ni, lo que es más grave, en la elección de los materiales convenientes. Sin embargo, este método ha sido el más utilizado en el pasado, recopilándose una gran cantidad de datos experimentales que, analizados estadísticamente con posterioridad, han proporcionado unas expresiones empíricas que han tenido un amplio uso práctico. Pero la Ciencia de Materiales es un campo vivo en el que, de una manera continua, se están desarrollando nuevos materiales que, en algunos casos, sustituyen a los que tradicionalmente se han venido utilizando, por lo que, los métodos empíricos, pueden no ser aplicables a las situaciones en las que intervienen estos nuevos materiales.

Alternativamente al método anterior, cabe la posibilidad de tratar de analizar el problema de la penetración de un sólido en otro, desde una perspectiva teórica, cuyas predicciones sean contrastadas con lo que sucede en la realidad; en esa dirección se han desarrollado numerosos modelos predictivos, de mayor o menor dificultad teórica, y que se pueden agrupar en los modelos analíticos, en los que se resuelven las ecuaciones del

movimiento de los sólidos participantes utilizando una serie de hipótesis simplificadoras, y en los numéricos, que se basan en los métodos de las diferencias finitas y elementos finitos. La separación entre ambos tipos de modelos debiera quedar clara y meridiana según utilicen, o no, el ordenador. Sin embargo, hay otros modelos -los modelos ingenieriles- que, conservando un planteamiento puramente analítico, adquieren tal complejidad que requieren el uso de ordenador para su uso práctico. La frontera entre estos últimos y los modelos puramente numéricos no está clara, si bien el tiempo de ejecución que requieren los primeros es incomparablemente más bajo que el correspondiente a los segundos, lo que les hace especialmente útiles en los procesos de diseño por la cantidad de análisis paramétricos que permiten efectuar.

Los modelos anteriores tienen una validez que viene fijada por el tipo del régimen de penetración que tiene lugar en el problema de impacto que se analiza, por lo que, antes de pasar a la presentación de los modelos precitados, es conveniente discutir los regímenes de penetración que pueden producirse.

2. REGIMENES DE PENETRACION

Uno de los primeros pasos que se efectúa, tras una prueba de impacto real, es el análisis del cráter que se ha formado en el blanco, en el que se incluye la medida de su profundidad, su diámetro y su volumen. Tras muchos años de investigación, se ha comprobado que, la forma del cráter, cambia con la velocidad de impacto, pudiéndose definir tres regímenes diferentes de penetración, que son mostrados en la figura 1 (Christman y Gehring [1]), que corresponde al impacto de una barra cilíndrica de acero de alta resistencia sobre una placa de aluminio. En la parte superior de esta figura, el proyectil sufre una pequeña deformación plástica, mientras que el blanco ha sufrido las deformaciones plásticas necesarias para que el proyectil haya quedado acomodado en su seno, presentando el cráter un diámetro ligeramente superior al del proyectil. En este régimen de penetración, que se conoce como a **baja velocidad**, la profundidad del cráter es proporcional a la velocidad de impacto elevada a $4/3$. A medida que la velocidad crece, se alcanza una velocidad crítica en la que se genera un estado tensional en el proyectil que es capaz de romperlo. Por encima de esta velocidad, aumenta el número de fragmentos en que se divide el proyectil, incrementándose el área de interacción con el blanco, resultando un pérdida de energía más rápida que en el régimen anterior, y produciéndose un cráter más ancho y menos profundo. Este **régimen de transición o régimen a alta velocidad** está ilustrado en las tres figuras intermedias de la figura 1, y que corresponden, respectivamente, al comienzo de este régimen, en pleno régimen y al final del mismo. A partir de este último instante, al aumentar

la velocidad, la profundidad del cráter comienza a crecer de nuevo, siendo proporcional a la velocidad elevada a $2/3$, y adquiriendo el cráter una forma semiesférica. Se ha entrado en el **régimen de hipervelocidad**: las características resistentes de los materiales dejan de poseer un papel relevante, comportándose éstos más bien como fluidos que como sólidos.

En resumen (Wilbeck et al. [2]), en el régimen a baja velocidad, las presiones desarrolladas en la interfase proyectil/blanco son moderadamente bajas de forma que el proyectil puede ser considerado como indeformable; en el de alta velocidad, esas presiones de impacto son lo suficientemente grandes como para causar la deformación plástica, y hasta la rotura, del proyectil; y en el régimen de hipervelocidad las presiones superan ampliamente las resistencias de blanco y proyectil, de forma que la erosión de ambos, y su comportamiento como fluidos, es el efecto que predomina en el problema.

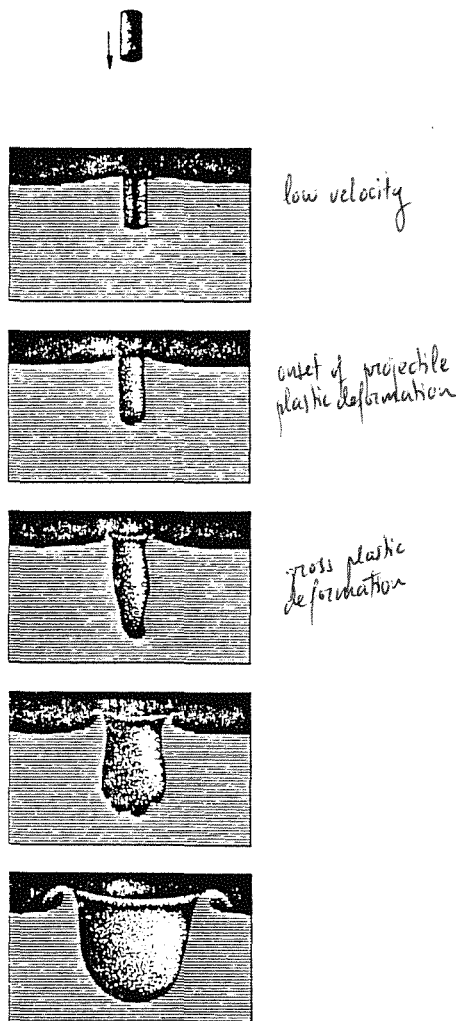


Fig. 1. Regímenes de penetración

3. MODOS DE ROTURA DE UN BLANCO

Los diferentes modos de rotura de un blanco (Sedgwick [3]) están esquematizados en la figura 2. La figura 2 (a) muestra un tipo de rotura que aparece cuando la compresión generada tras el impacto supera la resistencia dinámica a la compresión del material del blanco, produciéndose la rotura en compresión en la región menos confinada de la placa. La figura 2 (b) representa un caso de rotura en el que aparecen grietas radiales, o circunferenciales, en zonas ya afectadas por el paso de la onda de compresión generada tras el impacto, debido a un comportamiento frágil del material del blanco frente a las tensiones radiales, o circunferenciales, de tracción. La figura 2 (c) presenta un tipo de rotura debido a que la magnitud de las ondas de tracción, generadas tras el proceso de reflexión de las de compresión en la cara libre del blanco, supera la resistencia a tracción dinámica del material. La figura 2 (d) ilustra uno de los casos que aparecen más frecuentemente en el caso de materiales metálicos, en los que se forma una especie de tapón del material del blanco, de un radio similar al del proyectil deformado, y que sale junto al proyectil; la tendencia a este tipo de rotura aumenta con el valor de la tensión de cedencia del material o con su dureza Brinell, lo que puede ser explicado si se tiene en cuenta que, cuanto más duro sea el material del blanco, más difícil resulta moverlo en dirección radial, por lo que aparece una concentración de grandes deformaciones tangenciales plásticas en una zona estrecha, delante de la cabeza del proyectil y en la vecindad de su periferia. Las figuras 2 (e) y (f) muestran un tipo de rotura, en placas relativamente gruesas y delgadas, respectivamente, similar al ya comentado de fractura radial, y causado por las altas tensiones circunferenciales que actúan a lo ancho del espesor de la placa. La figura 2 (g) presenta el caso de fragmentación del material del blanco que se produce en un impacto a alta velocidad sobre placas delgadas. Por último, la figura 2 (h) muestra el caso en el que se forma en el blanco un perfecto agujero casi cilíndrico; este tipo de rotura es característico para blancos muy dúctiles.

4. METODOS EMPIRICOS

A pesar de que existen tres regímenes básicos, en lo que sigue se presentarán aquellos modelos, aplicables a las situaciones en las que las características resistentes de blanco y proyectil juegan un papel relevante (Impacto a baja velocidad), y esos otros en los que las presiones desarrolladas en el contacto superan con creces las características resistentes de los materiales involucrados y que, por lo tanto, sus comportamientos se asemejan a los de los fluidos (pérdida de la resistencia a la cizalladura).

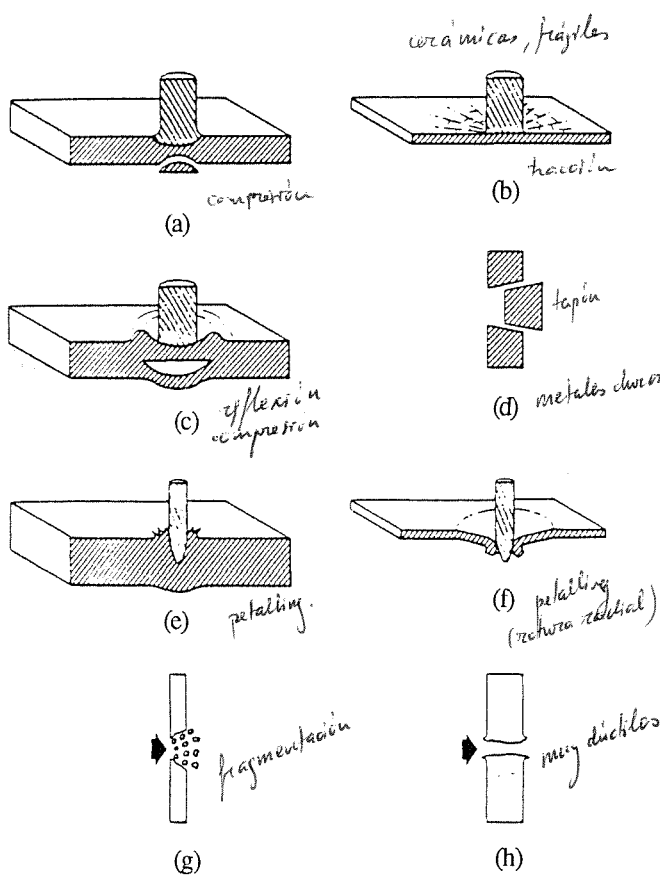


Fig. 2. Diferentes formas de rotura bajo impacto

a) Impacto a baja velocidad

Las ecuaciones de uso más extendido, que permiten determinar la velocidad y peso residuales (velocidad y peso tras la perforación) del proyectil, para el problema de impacto de un fragmento de acero de forma cilíndrica, o cúbica, de una razón altura-diámetro próxima a la unidad, son las obtenidas en la Universidad de Johns Hopkins en el proyecto denominado Thor [4,5]. Un ejemplo del tipo de ecuaciones, que se obtuvieron tras el ajuste por mínimos cuadrados de los resultados experimentales, es el siguiente:

$$V_r = V_s - 10^C (hA)^a (m_s)^b (\sec \theta)^c V_s^d$$

donde:

- V_r = velocidad residual del fragmento (pies/s)
- V_s = velocidad de impacto (pies/s)
- h = espesor del blanco (pulgadas)
- A = área de impacto del fragmento (pulgadas²)

m_s = peso del fragmento (grains) (1 grain es equivalente a 0.065 gramos)

θ = ángulo de impacto medido respecto a la vertical al blanco

C, a, b, c, d = constantes o coeficientes que dependen del tipo de material del blanco, y que se presentan en la tabla 1 para un conjunto de materiales.

La ecuación anterior puede resolverse para cada caso haciendo V_r igual a cero, lo que proporcionaría la máxima velocidad de impacto del fragmento que es capaz de detener la placa de material que se considera.

TABLA 1

| Material | C | a | b | c | d |
|----------|------|------|-------|------|-------|
| Aluminio | 7.05 | 1.03 | -1.07 | 1.25 | -0.14 |
| Acero | 6.45 | 0.89 | -0.95 | 1.26 | 0.02 |
| Plomo | 2.00 | 0.50 | -0.50 | 0.66 | 0.82 |
| Lexan | 2.91 | 0.72 | -0.66 | 0.77 | 0.60 |
| Vidrio | 3.74 | 0.71 | -0.72 | 0.69 | 0.47 |

Otro modelo empírico, más reciente y que ha tenido una amplia difusión, es el de Lambert [6]. En él, la velocidad residual, V_r , de un proyectil que atraviesa una placa metálica se expresa como:

$$V_r = \alpha (V_s - V_1)^{1/p}$$

donde: V_1 es la velocidad de impacto a la cual el proyectil es detenido; α , un parámetro que depende del tipo de metal utilizado para el blanco y, finalmente, p , es otro parámetro que depende, a su vez, del espesor del blanco, del diámetro y de la masa del proyectil, y del ángulo de impacto.

Uno de los campos donde la Mecánica del Impacto presenta una gran aplicación es en el de la protección personal. Así, por ejemplo, para el caso de tejidos realizados con fibra de nylon, y para un proyectil de bajo calibre, existen expresiones como la proporcionada por Lyons [7]:

$$V_1 = 483.6 [W/A]^{0.357}$$

donde V_1 es la máxima velocidad de impacto que resiste el tejido, expresada en m/s, y W/A representa la densidad areal del tejido en g/cm².

b) Impacto a alta velocidad

Uno de los primeros modelos empíricos para este

problema, en el caso de que el proyectil y el blanco estén realizados del mismo material, es el proporcionado por McHugh [8] que propone una expresión para el diámetro final del cráter generado en el blanco.

Para el caso de impacto aluminio-aluminio en el rango de velocidades comprendido entre 1 y 8 km/s, se puede utilizar el modelo de Maiden et al. [9]

$$D/d = 2.4 V/c (h/d)^{2/3} + 0.9$$

donde D y d son los diámetros del cráter y del proyectil, respectivamente, h el espesor del blanco, V la velocidad de impacto y c la velocidad del sonido en el aluminio.

5. METODOS ANALITICOS

a) Impacto a baja velocidad

Los primeros modelos analíticos aplicables a problemas de impacto datan de la década de los 40, pero es en la de los ochenta cuando han experimentado un amplio desarrollo, sobre todo tras comprobar que los métodos numéricos, a pesar de que la rapidez de los nuevos ordenadores es muy grande, presentan poca flexibilidad para analizar paramétricamente un determinado problema. Todos los modelos analíticos se basan en la observación del proceso de penetración de un proyectil sobre un blanco, y en el establecimiento de una serie de estados intermedios, en los que se postula dividido el proceso de penetración, en los que predomina un determinado mecanismo de deformación. La aplicación de los principios básicos de la Mecánica conducen a un conjunto de ecuaciones que, una vez resueltas, proporcionan la solución buscada.

A continuación se proporciona una relación de los modelos analíticos más usuales para el caso de un proyectil rígido que impacta sobre un blanco formado por un solo material. Los modelos aparecen agrupados según el número de mecanismos de penetración que consideran.

Modelos unidimensionales:

a) Un solo mecanismo de perforación: Taylor [10], Nishiwaki [11], Thompson [12], Zaid y Paul [13], Recht e Ipson [14], Heyda [15].

b) Varios mecanismos de perforación: Awerbuch y Bodner [16], Woodward y DeMorton [17].

c) Varios mecanismos de deformación junto con modelos estructurales de deformación: Marom y Bodner [18], Shadbolt et al. [19].

Modelos bidimensionales:

d) Varios mecanismos de perforación: Ravid y Bodner

[20], Ravid et al. [21].

La descripción de todos y cada uno de estos modelos se sale fuera del objetivo de esta comunicación; sin embargo, en un trabajo anterior [22], se describieron los modelos más recientes ([16],[20] y [21]), y allí se remite al lector para una mejor comprensión de los mismos.

Para el caso particular de impacto sobre materiales compuestos, recientemente Zhu et al. [23,24], han propuesto un nuevo modelo analítico que se basa en la teoría de laminados, y que incluye mecanismos disipativos de energía como el de indentación de la punta del proyectil, abombamiento de la cara libre de la placa de material compuesto, rotura de las fibras, delaminación y fricción. Ellos dividen el proceso de penetración en tres estados: indentación del proyectil, perforación y salida, proporcionando las fuerzas que se oponen al avance del proyectil. Comparando los resultados de su predicción teórica con los experimentales se obtiene un buen acuerdo, excepto en la evolución temporal de la fuerza de frenado, para lo que necesitan suponer una deformación de rotura de las fibras del material compuesto algo elevada (concretamente, para fibra de aramida suponen una deformación de rotura del 4% cuando un valor más realista de la misma, para las velocidades de deformación presentes en este tipo de problemas, está en el rango 2-3.3 %).

Todos los modelos referenciados hasta aquí analizan el problema de impacto en un blanco formado por un solo material, pero cada día es más corriente la realización de blindajes mixtos formados por dos, o más, materiales distintos. Una de sus configuraciones más utilizadas en la actualidad es la formada por losetas de material cerámico pegadas sobre un soporte metálico o de material compuesto. Una de las primeras modelizaciones de este problema fue llevada a cabo por Florence [25] a finales de los sesenta. Este modelo está basado en la idea de que la loseta cerámica rompe, según un tronco de cono, y distribuye la carga de impacto sobre la zona de la placa metálica que la soporta y que, ella sola, es la encargada de absorber toda la energía desarrollada en el impacto. Un resumen de las ecuaciones que proporciona este modelo quedaron recogidas en [26].

Más recientemente han aparecido otros dos modelos analíticos, también para el caso de impacto normal sobre un blanco cerámica/metal, y que se deben a Woodward [27] y a Reijer [28]. Una comparación entre los resultados de los dos modelos anteriores y el primitivo de Florence [25] ya se presentó en nuestra reunión anual de 1992 [26]. Sin embargo, allí no se pudieron describir, al menos cualitativamente, por lo que se comentan, brevemente, a continuación.

El modelo de Woodward [27] considera que el proyectil y el material cerámico están interaccionando de manera

que, dependiendo del valor relativo de la fuerza de interacción respecto a las resistencias de los materiales del proyectil y del blanco, pueden erosionarse sólo el proyectil, sólo la cerámica o ambos a la vez. Las ecuaciones que plantea para el blanco y el proyectil son: la ley de Newton, el teorema de la cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad; la influencia de la placa metálica se contabiliza suponiendo que ejerce sobre el material cerámico una fuerza adicional de frenado. En la actualidad, en nuestro Departamento se está tratando de aplicar la filosofía de este modelo al caso en el que la placa sustentadora de la cerámica estuviera realizada de material compuesto.

El modelo de Reijer [28] es mucho más sofisticado que el anterior: divide el proceso de penetración en tres etapas diferentes. En la primera, el material cerámico permanece sin deformarse y es el proyectil el que sufre un proceso de deformación puramente plástico; el tiempo que dura esta etapa es igual al que tarda el material cerámico en fracturarse y pulverizarse totalmente; este tiempo se toma igual al que tarda la onda de compresión en alcanzar la intercara cerámica/metal más lo que tardan las fisuras, allí producidas, en alcanzar la cara donde se produjo el impacto. En la segunda etapa se produce una situación similar a la del modelo de Woodward [27], erosionándose el proyectil y la cerámica. En la tercera etapa, que comienza una vez que el proyectil deja de erosionarse, se produce el frenado del mismo por la fuerza que ejerce la placa metálica al deformarse.

Otro posible tipo de blindaje es uno similar al anterior pero en el que se ha sustituido la placa metálica por otra de material compuesto de matriz orgánica y de varias capas de tejido balístico. Para esta situación, Hetherington y Rajagolapan [29] han propuesto un modelo analítico, que se basa en el propuesto por Florence [25], y que ha proporcionado muy buenos resultados cuando se comparan las predicciones del mismo con los resultados experimentales [26].

Otra situación bastante común en este tipo de aplicaciones es el caso de blindajes mixtos formados por losetas de cerámica pegadas sobre una placa de material compuesto que, a su vez, va situado sobre varias capas de tejido balístico. Para esta situación también se dispone de un modelo predictivo cuyas bases científicas [30] serán presentadas en otra comunicación dentro de esta misma Reunión [31].

b) Impacto a alta velocidad.

En un artículo previo [22] se presentó uno de los modelos más utilizados para el caso de impacto en el régimen de hipervelocidad. Concretamente se trataba del modelo unidimensional de Tate [32], en el que se supone que, tanto blanco como proyectil, se erosionan en virtud de la hipótesis de que la fuerza de interacción blanco-proyectil supera las resistencias mecánicas de

ambos materiales. Las ecuaciones que se plantean en ese modelo son: la correspondiente al segundo axioma de Newton; una ecuación de continuidad para el material del proyectil; y una ecuación del tipo de la de Bernoulli con una serie de modificaciones. En esta última ecuación es en la que reside la mayor aportación del modelo de Tate [32]. Este modelo ha servido de base a muchos otros, como por ejemplo el propuesto por Jones et al. [33], pero éstos son meras modificaciones, sino sutilezas, del modelo anterior.

6. METODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos, que se han utilizado para el tratamiento de los problemas de impacto, se basan en los métodos de las diferencias finitas o de los elementos finitos, encontrándose, en la actualidad, programas disponibles hasta para ordenadores personales. Un amplio resumen sobre las características principales de los programas comerciales puede ser encontrado en el libro de Zukas [34].

Las primeras modelizaciones numéricas de problemas de impacto se llevaron a cabo en lo que, anteriormente, se definió como el régimen de la hipervelocidad dado que, en él, el comportamiento de los materiales puede ser supuesto como si éstos fueran medios fluidos. Normalmente se ha utilizado la expresión de "programas hidrodinámicos" al referirse a esos tipos de programas. En ellos los materiales, modelizados como continuos, deben cambiar su forma externa, pudiendo presentar nuevas superficies, como consecuencia de su progresiva rotura. Los modelos de los materiales más utilizados requieren que se postulen criterios instantáneos de rotura como, por ejemplo, aquellos que se refieren a una tensión, o deformación, de rotura, trabajo plástico u otro tipo de criterio similar.

Otro aspecto muy importante reside en el tipo de modelización que utilizan. Existen programas en los que los cuerpos que interaccionan se modelizan mediante mallas lagrangianas, que se deforman y mueven con el sólido, otros que utilizan mallas eulerianas, que permanecen fijas en el espacio a lo largo del tiempo, siendo los materiales los que se mueven a través de ellas, y, por último, existen programas que permiten modelizar unos sólidos empleando mallas lagrangianas y otros utilizando mallas eulerianas.

En la presente comunicación se presentan varios ejemplos que ilustran lo anterior: a) Impacto de un proyectil sobre varias capas de tejido balístico; b) Impacto de una barra de acero sobre un blindaje mixto cerámica-metal; y c) Impacto de una bola de acero sobre un blanco también de acero.

Impacto de un proyectil sobre varias capas de tejido balístico

Este problema corresponde al impacto de un proyectil 9 mm Parabellum (8 gramos de masa y 405 m/s de velocidad) sobre 27 capas de tejido Kevlar de alta tenacidad. Este caso ha sido ampliamente analizado por nosotros utilizando el programa NOVA2D [35]. El sistema se modelizó en condiciones de simetría axial empleando 1021 nudos y 534 cuadriláteros, y se consideró sólo la zona del blanco en un radio de 60 mm alrededor de la dirección del impacto. El núcleo del proyectil es de plomo y la camisa que le confina es de latón. Para ambos materiales se supuso un comportamiento elasto-plástico convencional, mientras que al tejido Kevlar se le supuso un comportamiento elástico lineal hasta la rotura. Todos los parámetros intervinientes en las ecuaciones constitutivas de los materiales fueron tomados de la bibliografía existente. Cada conjunto de tres capas del paquete original de Kevlar se modelizó como si se tratara de un solo sólido; esto es: cada subpaquete, formado por tres capas, podía contactar con los situados inmediatamente encima y debajo del considerado. Lógicamente lo anterior complicó extraordinariamente el análisis, requiriendo unos tiempos de proceso bastante altos, pero se hizo necesario emplear la modelización descrita cuando, en análisis previos, se comprobó que una modelización de las capas de tejido como si éstas formaran un solo paquete homogéneo, había conducido a resultados numéricos muy alejados de la realidad experimental.

En la figura 3(a) se presenta la configuración inicial de problema, en la que el núcleo de plomo del proyectil es de color negro. En la figura 3(b), que corresponde a un tiempo de 36 microsegundos después del impacto, se observa como el plomo del núcleo del proyectil se encuentra sufriendo un proceso de deformación plástica restringida por la camisa de latón que lo contiene. Las figuras 3(c) y (d) corresponden a 90 y 256 microsegundos, respectivamente. La detención del proyectil se realizó transcurridos 324 microsegundos desde el instante inicial, recogiendo en la figura 3(e) los aspectos del proyectil antes y después del impacto, pudiéndose comparar la forma del mismo al final del proceso con la recogida en la figura 3(d). Por otra parte, el máximo desplazamiento del blindaje, según la dirección de impacto, obtenido de la simulación numérica resultó estar muy próximo al experimental, que se obtuvo de la huella dejada, en la prueba de fuego real, por el paquete de tejido sobre una capa de plastelina puesta detrás.

Impacto de una barra de acero sobre un blindaje mixto cerámica metal.

En este segundo problema se estudia el proceso de penetración de una barra de acero (ETG-100) de 6.00 mm de diámetro y 31.5 mm de longitud que, viajando a

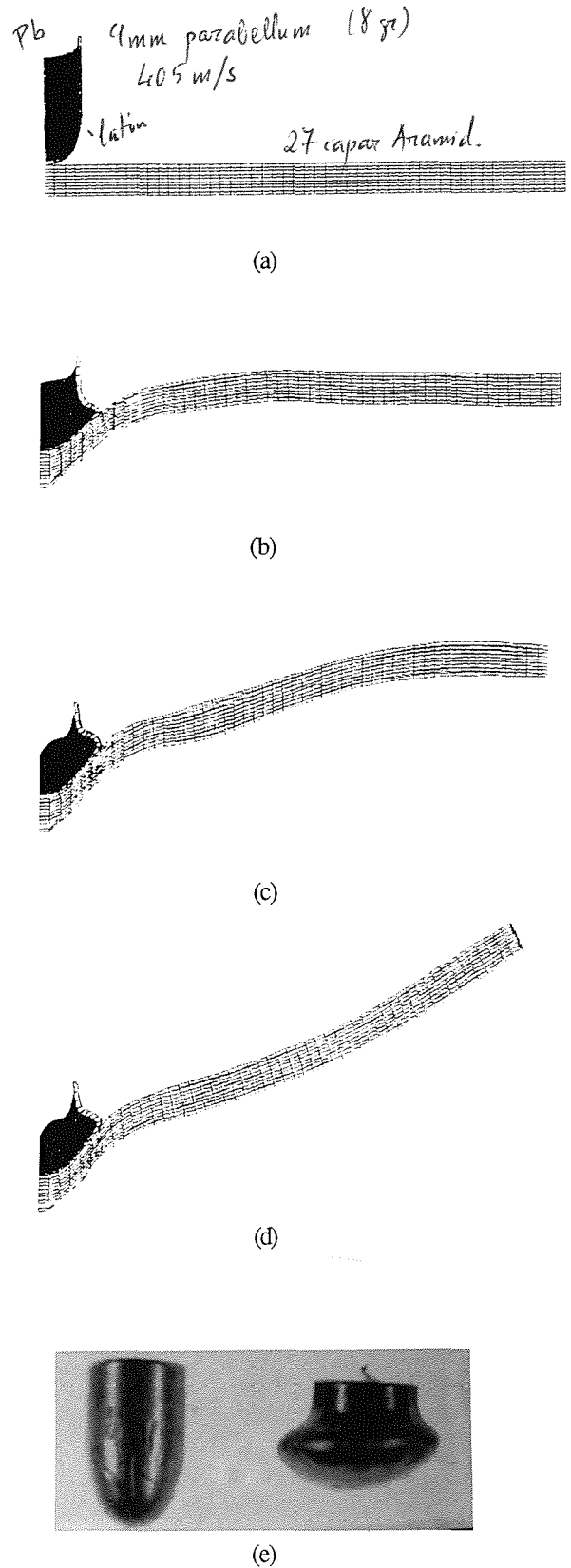


Fig. 3. Impacto de un proyectil contra tejido

una velocidad de 916 m/s, impacta sobre una placa mixta formada por una placa de alúmina AD-96 de 8.1 mm de espesor soportada por otra de aluminio 6061-T6 de 6.0 mm de espesor. Experimentalmente se comprobó (Reijer [28]) que el proyectil considerado equivalía, en cuanto se refiere a su poder de penetración, al proyectil 7.62 NATO AP.

El análisis numérico se realizó utilizando el programa comercial AUTODYN [36]. El proyectil se modelizó mediante una malla lagrangiana de 92 nudos y 66 elementos, mientras que, para el blanco, se utilizó una malla euleriana de 608 elementos, de los cuales 160 se encontraban ocupados, inicialmente, por el material cerámico y 128 por el aluminio, permaneciendo el resto de elementos sin ningún tipo de material.

Para los dos materiales metálicos se supuso un comportamiento elásto-plástico sin endurecimiento por deformación. Para el material cerámico se utilizó un modelo de resistencia del tipo de Mohr-Coulomb, en el que la tensión de cedencia del material es una función lineal de la presión a la que se encuentra sometido. Los criterios de rotura para los materiales metálicos se basaban en el de deformación crítica mientras que, para la cerámica, se supuso una tensión hidrostática de tracción de rotura.

En la figura 4 (a) se recoge la configuración inicial de blanco y proyectil, y, en la figuras 4 (b), (c) y (d) se recogen dichas configuraciones a los 7.53, 43.75 y 83.3 microsegundos, respectivamente. Como puede observarse en la última figura, el caso estudiado corresponde a un caso de perforación del blanco. También para este caso existen medidas experimentales -concretamente, de la posición de la cara posterior del proyectil-, realizadas por Reijer [28] mediante técnicas de rayos X. En la figura 4(e) se recogen las posiciones temporales de la cara posterior del proyectil obtenidas experimental y numéricamente, pudiéndose apreciar el alto grado de acuerdo existente entre ambas.

Impacto de una bola de acero sobre una placa de acero.

En este último caso se presenta al caso del impacto de una bola de un acero de dureza 262 HV10, de 50.8 mm de diámetro, 533.5 gramos de masa, que impacta a 1885 m/s contra un blanco también de acero (305 HV10) de espesor 130 mm y resistencia de 900 MPa. Este problema ha sido analizado experimentalmente por el Prof. Buchar [37] de la Universidad de Brno (República Checa) dentro del marco de un proyecto de investigación común con nuestro Departamento.

También en este caso se utilizó el programa AUTODYN [36]. El proyectil se modelizó utilizando una malla lagrangiana de 50 nudos y 31 elementos mientras que, para el blanco, se utilizó una malla euleriana, de 660 nudos y 608 elementos, en la que, inicialmente, el acero ocupaba 380 elementos, quedando

el resto de elementos sin rellenar de ningún tipo de material.

Para ambos tipos de acero se supuso una relación constitutiva como la propuesta por Johnson y Cook [38] y una ecuación de estado lineal.

En la figura 6 (a) se aprecia la configuración inicial del proyectil y del blanco. Las figuras 5 (b), (c), (d) y (e) corresponden a las configuraciones a 10.05, 30.04, 130.00 y 171.30 microsegundos, respectivamente. En la figura 5 (f) se incluye una foto del estado en que quedó el cráter formado en el blanco, pudiéndose comparar su forma con la obtenida en el proceso de simulación numérica (figura 5 (e)). Experimentalmente también se comprobó que, el proyectil, se erosionaba prácticamente en su totalidad.

7. CONCLUSIONES

Todo lo anterior pone de manifiesto la gran cantidad de modelos predictivos que existen para el análisis de los problemas de impacto y, por tanto, la gran cantidad de esfuerzo que se ha realizado en el pasado, y que se está realizando en el presente, en esta dirección. Los modelos aquí denominados empíricos, tienen un campo de utilización limitado por sus intrínsecas limitaciones: no deben ser aplicados más allá de aquellas situaciones que resulten similares a las que se utilizaron en su obtención, lo que limita claramente su aplicabilidad. Los modelos analíticos, al resolver las ecuaciones, más o menos simplificadas, que rigen el problema, tienen un campo de aplicación mucho más amplio que los anteriores pero, de nuevo, su rango de aplicación viene limitado por en qué medida se cumplen las hipótesis de partida en el caso concreto que se pretende analizar; así, por ejemplo, un modelo analítico en el que se suponga que el proyectil permanece sin sufrir ningún tipo de deformación durante el impacto sólo es aplicable a aquellas situaciones en las que se cumpla escrupulosamente esta hipótesis o, de no cumplirse, que la situación real se asemeje grandemente a la supuesta. Los últimos modelos -los modelos numéricos- presentan un campo de aplicación mucho más grande todavía, pero eso es a costa de un gran consumo de tiempo de computación. De hecho, los tres ejemplos que se han mostrado, y que corresponden a tres situaciones muy distintas, demuestran las grandes posibilidades que ofrecen estos últimos métodos.

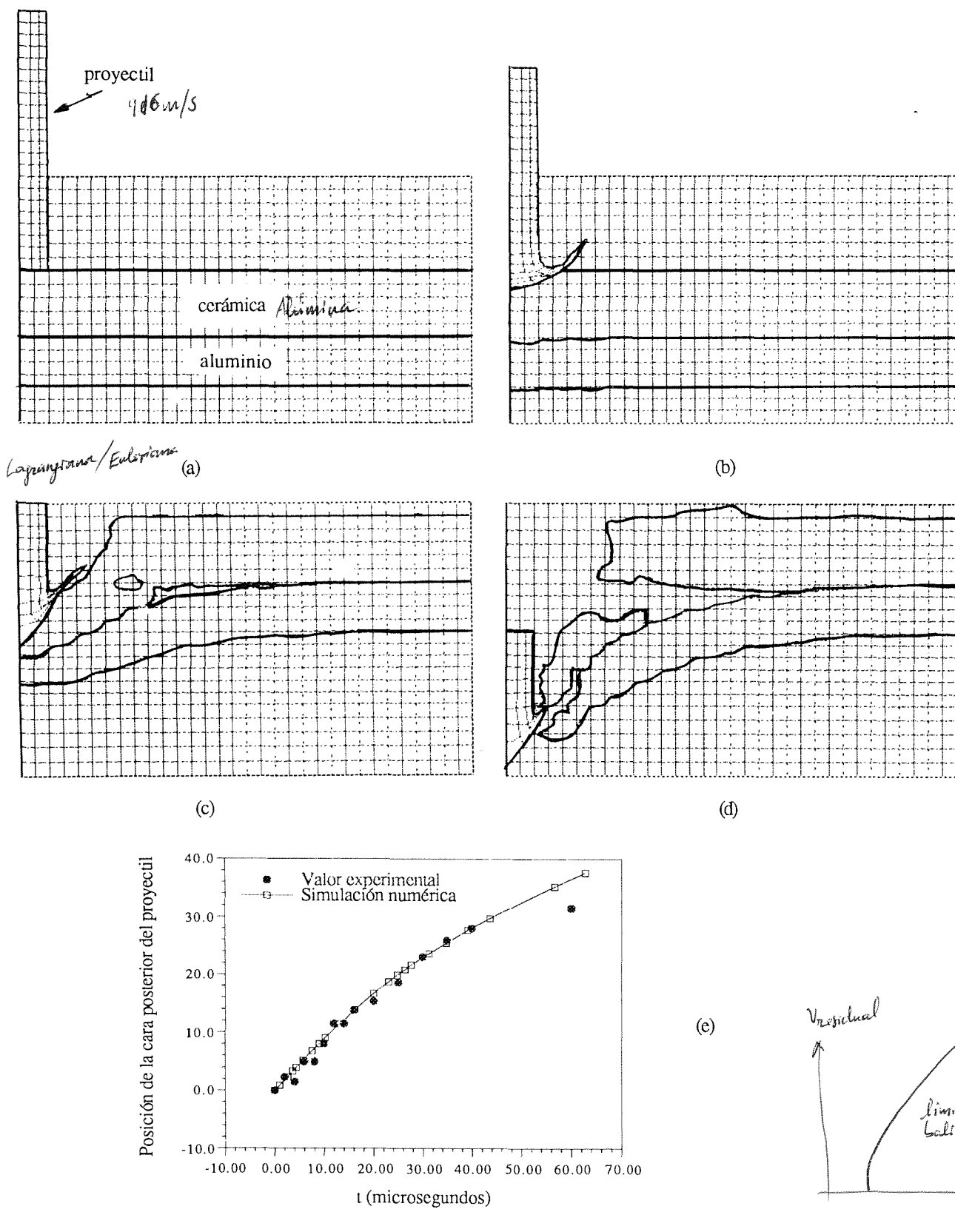


Fig. 4. Impacto de un proyectil contra un blanco cerámica-aluminio

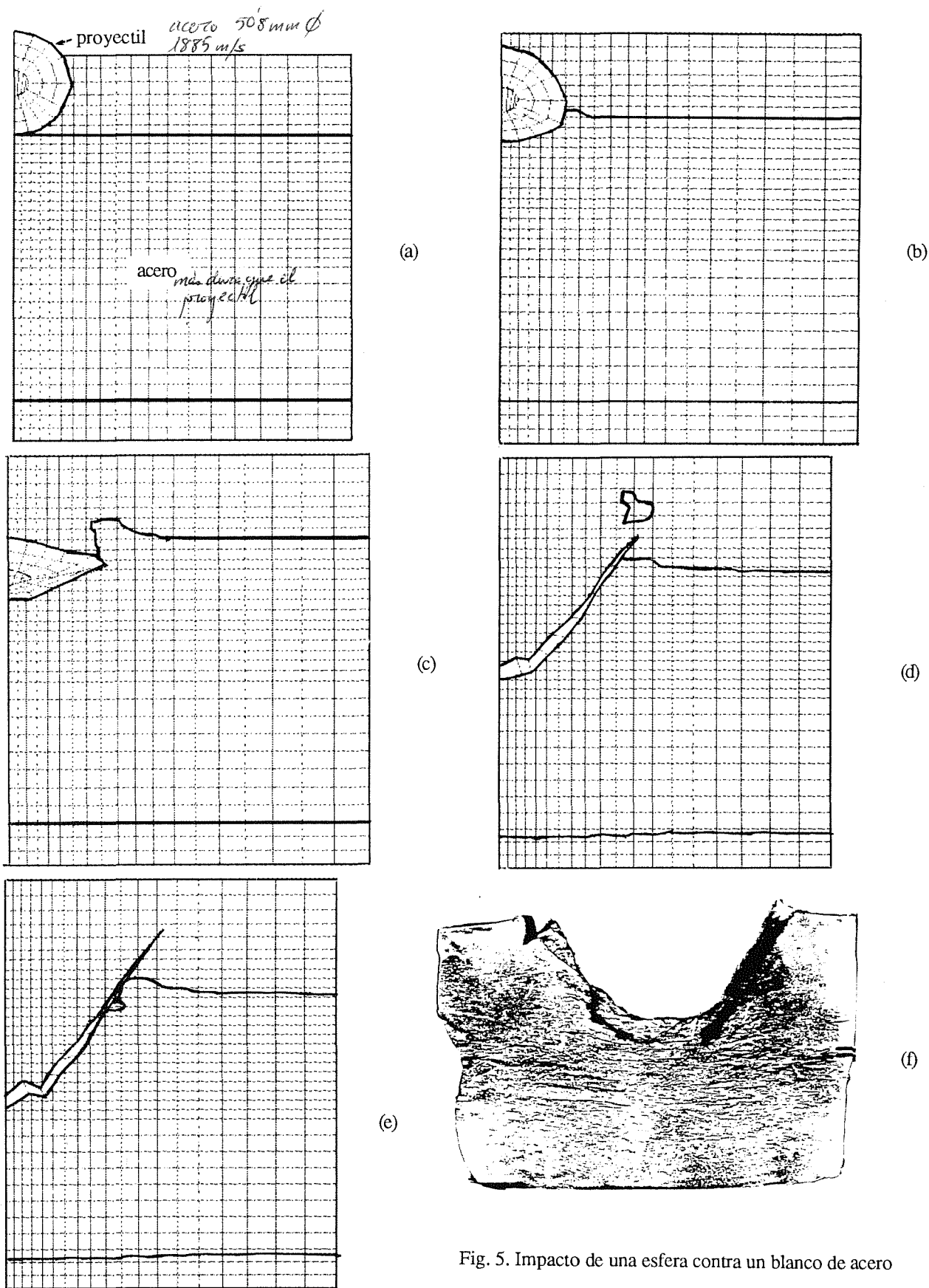


Fig. 5. Impacto de una esfera contra un blanco de acero

8. REFERENCIAS

- [1] Christman, D.R. y Gehring, J.W., "Penetration mechanisms of high velocity projectiles", General Motors Defense Research Laboratories, Report TR 65-50 (1965).
- [2] Wilbeck et al., "A short course on penetration mechanics", Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, (1988).
- [3] Sedgwick, R.T., "Theoretical terminal ballistic investigation and studies of impact at low and very high velocities", Air Force Armament Laboratory Technical Report AFATL-TR- 68-61, (1968).
- [4] Project Thor Tr No. 47, "The resistance of various metallic materials to perforation by steel fragments; empirical relationships for fragment residual velocity and residual weight", (1961).
- [5] Project Thor Tr No. 51, "The resistance of various non-metallic materials to perforation by steel fragments; empirical relationships for fragment residual velocity and residual weight", (1963).
- [6] Lambert, J.P., Ballistic Research Laboratory, ARBRL-TR-02066, (1978).
- [7] Lyons, W.J., "Impact phenomena in textiles", Cambridge, Mass., M.I.T. Press, (1963).
- [8] McHugh, A.H., "Evaluation of hypervelocity impact damage to a thin sheet by multiple regression analysis", North American Rockwell Report NAAS/S & ID STR 152, (1966).
- [9] Maiden, C.J., et al., "Investigation of fundamental mechanism of damage to thin targets by hypervelocity projectiles", GM TR 63-225, (1964).
- [10] Taylor, G.E., Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol 1. (1948).
- [11] Nishiwaki, J., "Resistance to the penetration of a bullet through an aluminium plate", J. Phys. Soc. Japan, Vol. 6, (1951).
- [12] Thompson, W.T., "An approximate theory of armor penetration", J. Appl. Phys., Vol. 26, No. 1, (1955).
- [13] Zaid, M. y Paul, B., "Mechanics of high speed projectile penetration", J. Franklin Inst., Vol. 264, (1957).
- [14] Recht, R.F. e Ipson, T.W., "Ballistic perforation dynamics", J. Appl. Mech., Vol. 30, (1963).
- [15] Heyda, J.F. "Ballistic impact into thin plates", General Electric Co., Space Sciences Laboratory, Materials and Mechanics TM 70-002, (1970)
- [16] Awerbuch, J. y Bodner, S.R., "Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates", Int. J. Solids & Structures, Vol. 10, (1974).
- [17] Woodward, R.L. y DeMorton, M.E., Int. J. Mech. Sciences, Vol. 18, (1976).
- [18] Marom, I. y Bodner, S.R., "Projectile perforation of multilayered beams", Int. J. Mechanical Sci., Vol. 21, (1979).
- [19] Shadbolt, P.J. et al., "A comparison of plate perforation models in the subordnance impact velocity range", Int. J. Impact Engng., Vol.1, No. 1 (1983).
- [20] Ravid, M. y Bodner, S.R., "Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles", Int. J. Engng. Sci., Vol. 21, No. 6, (1983).
- [21] Ravid et al., "Analysis of very high speed impact", Int. J. Engng. Sci., Vol. 25, (1987).
- [22] Cortés, R. et al., "Comportamiento en rotura por impacto de materiales metálicos y cerámicos: modelizaciones numérica y analítica", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 7, (1990).
- [23] Zhu, G., et al., "Penetration of laminated kevlar by projectiles -I. Experimental investigation", Int. J. Solids Structures, Vol. 29, No. 4, (1992).
- [24] Zhu, G., et al., "Penetration of laminated kevlar by projectiles -II. Analytical model", Int. J. Solids Structures, Vol. 29, No. 4, (1992).
- [25] Florence, A.L., "Interaction of projectiles and composite armour part II", Stanford Research Institute, AMMRG-CR-69-15, (1969).
- [26] Navarro, C. et al., "Modelización numérica de la fractura por impacto en un blindaje de cerámica", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 9, (1992).
- [27] Woodward, R.L., " A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat", Int. J. Impact Engng., Vol. 9, (1990).
- [28] Reijer, P.C., "Impact on ceramic faced armour", Tesis doctoral, Universidad de Delft, Holanda, (1991).
- [29] Hetherington, J.G. y Rajagolapan, B.P., "An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation on composite armours", Int. J. Impact Engng., Vol. 11, (1991).

[30] Navarro, C. et al., "Some observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates", *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 13, No. 1, (1993).

[31] Navarro, C., et al., "Comportamiento de placas mixtas cerámica composite bajo cargas de impacto", *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. X, (1993).

[32] Tate, A., "A theory for the deceleration of long rods after impact", *J. Mech.Phys. Solids*, 15, (1969)

[33] Jones, S.E. et al., "On the penetration of semi-infinite targets by long rods", *J. Mech. Phys. Solids*, 35, (1987).

[34] Zukas, J.A., "High velocity impact dynamics", John Wiley & Sons, Inc., (1990).

[35] PRINCIPIA ESPAÑA S.A., Programa NOVA2D, Manual del usuario, (1987).

[36] Century Dynamics: "AUTODYN", Versión 2.3, (1990).

[37] Buchar, J, Comunicación personal, (1992).

[38] Johnson, G.R., y Cook, W.H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", *Proc. 7th. Int. Symp. on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, (1983).

AGRADECIMIENTOS: El autor quiere dejar constancia de su agradecimiento a Instalaza S.A. tanto por su participación en dos de las investigaciones numéricas reseñadas como por la realización física de las pasadas de ordenador utilizando el código Autodyn. También quiere agradecer al Departamento de I+D de Induyco, S.A. su aportación experimental a parte de esta comunicación, y a Principia España S.A. por las facilidades dadas para la utilización de sus programas.