

COMPORTAMIENTO EN ROTURA POR IMPACTO DE MATERIALES METALICOS Y CERAMICOS: MODELIZACIONES NUMERICA Y ANALITICA.

Cortés, R., Navarro, C., Sánchez-Gálvez, V.

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

Resumen.- El presente artículo se relaciona con la modelización del comportamiento mecánico y la rotura de materiales metálicos y cerámicos sometidos al impacto de un proyectil a velocidades medias y altas. Dicha modelización se aborda, primero desde una perspectiva analítica, subdividiendo el proceso de penetración en diferentes fases, y aplicando los teoremas de la Teoría de la Plasticidad al campo de velocidades presente en la vecindad de la zona impactada. También se realiza la modelización numérica del problema de impacto, empleando un programa de ordenador para el análisis de problemas dinámicos con condiciones de contacto o impacto, basado en el método de las diferencias finitas con integración explícita en el tiempo. Los resultados obtenidos por ambas vías, en ciertos casos particulares, se comparan luego con las correspondientes observaciones experimentales, estableciéndose así la bondad de las modelizaciones propuestas para dichos casos.

Abstract.- The present article relates with the analytical and numerical modelling of the mechanical behaviour and fracture of metals and ceramics subjected to projectile impact at medium and high velocities. Analytical modelling is made by dividing the perforation process in different stages, and then, applying the Plasticity Theory to the velocity fields associated to each such stages. Numerical modelling is performed by means of a computer program for the full numerical analysis of dynamic problems with contact or impact, which is based on a finite difference scheme with explicit time integration. The results obtained by both methods in certain particular situations are compared with the corresponding experimental observations, the former showing a relatively good agreement with the latter.

1. INTRODUCCION

En los problemas de impacto de proyectiles de media y alta velocidad sobre blindajes de distintos materiales es preciso tener presente una serie de fenómenos, tales como el comportamiento termoviscoplastico a altas velocidades de deformación de los materiales intervinientes, el comportamiento en rotura de los mismos, los fenómenos posteriores de erosión en el proyectil y el blanco, etc., que juegan un papel importante en la resistencia frente a la rotura por impacto de un material y cuya correcta contabilización en los procesos de modelización predictiva es muy difícil.

En particular, en el caso de los materiales metálicos cabe esperar unos tipos de rotura, bajo condiciones de

impacto, de tipo dúctil en el material del blanco, produciéndose en él, procesos de formación de bandas adiabáticas que conducen a una rotura claramente localizada. Por el contrario, los materiales cerámicos presentan una rotura de tipo frágil, sin apenas deformarse macroscópicamente, y que se hace extensiva a una gran parte del blanco.

Los primeros modelos analíticos para la predicción del comportamiento de un material metálico bajo carga de impacto tienen un marcado carácter empírico, hasta que, a mediados de los años 70, Averbuch y Bodner [1,2] propusieron un modelo unidimensional para el caso de proyectil indeformable, que constaba de tres etapas diferentes, correspondientes a otros tantos mecanismos de perfora-

ción, en las cuales se hacía necesario utilizar algunos factores empíricos. El modelo se basa en el planteamiento y resolución de la ecuación de movimiento del proyectil, es decir:

$$\frac{d(mv)}{dt} = -F_D - F_C - F_S \quad (1)$$

donde:

m = masa del proyectil más una determinada masa del material del blanco.

v = velocidad del proyectil

t = tiempo

F_D = fuerza de resistencia inercial debida al movimiento de las partículas del blanco.

F_C = fuerza de resistencia debido a la rotura del material del blanco.

F_S = fuerza de resistencia debido a los fenómenos de corte producidos en el blanco.

El modelo anterior ofrece una gran facilidad de manejo aunque, como ya se dijo, utiliza algunos parámetros empíricos. A dicho inconveniente se une el hecho de que no se considera la dependencia de la velocidad de deformación, de las características resistentes del material del blanco.

En 1983, Ravid y Bodner [3] propusieron un nuevo modelo de perforación en el que, dicho proceso, es subdividido en cinco etapas diferentes. Este modelo considera que el proyectil es indeformable y supone que el comportamiento del material del blanco es rígido-viscoplastico hasta que alcanza la rotura, siendo la tensión de fluencia del material función logarítmica de la velocidad de deformación.

El modelo se basa en dividir el proceso de penetración en cinco etapas, como se puede observar en la figura 1, postulándose, en cada una de ellas, unos campos de velocidad de las partículas materiales del blanco de forma que se mantenga la incompresibilidad del material plastificado y la compatibilidad cinemática de las partículas del blanco con el contorno. En cada una de las etapas se aplica el teorema del límite superior de la Plasticidad incorporando los fenómenos inerciales originados por el movimiento de las partículas del blanco, en la forma sugerida por Tirosh y Kobayashi [4], planteándose, a continuación, la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_p = \dot{W}_v + \dot{W}_f + \dot{W}_l \quad (2)$$

siendo:

\dot{W}_p = potencia instantánea perdida por el proyectil

\dot{W}_v = potencia consumida en la deformación plástica del material del blanco

\dot{W}_f = potencia perdida por rozamiento

\dot{W}_l = potencia desarrollada por las fuerzas de inercia actuantes sobre las partículas materiales del blanco.

Una descripción más detallada de las magnitudes anteriores puede encontrarse en las referencias [3,4]. Conviene señalar que, la ecuación (2), proveniente de la aplicación del teorema del límite superior, corresponde a la siguiente desigualdad: Potencia perdida por el proyectil menor o igual que la Potencia consumida en el blanco para los campos de velocidad supuestos. Esto último equivale a decir que, en el modelo de Ravid y Bodner [3], la fuerza de frenado actuante sobre el proyectil es mayor o igual que la que se produce en la realidad.

Las cinco etapas del proceso de perforación que consideran Ravid y Bodner [3] (ver figura 1), corresponden a otros tantos mecanismos de deformación. Así, por ejemplo, la etapa 1 corresponde a un problema inicial de indentación dinámica del proyectil en el blanco que finaliza con la formación de un abultamiento esférico en la cara posterior del blanco (etapa 2) y que, en la etapa 3, comienza a avanzar en la dirección del movimiento del proyectil, alcanzándose, en la etapa 4, un estado de deformación en el blanco que conduce a una rotura progresiva de éste, comenzando la formación de un tapón de material que, al final de la etapa 4, es expulsado hacia afuera, continuando el proyectil (etapa 5) su movimiento.

Este modelo analítico de Ravid y Bodner [3] es el más completo del que se dispone actualmente para el estudio de impacto sobre materiales metálicos hasta velocidades del proyectil de 1000 m/s. Para velocidades superiores (hasta 3000 m/s) el proceso de perforación anteriormente descrito se ve ampliado por otros dos fenomenologías distintas: por una parte aparecen ondas de choque en proyectil y blanco, lo que conlleva la necesidad, para estudiar este efecto, de considerar las deformaciones de ambos. Por otra parte, surgen fenómenos de erosión, es decir, de una pérdida paulatina de masa, en el blanco y el proyectil.

El tratamiento del primer problema desde el punto de vista analítico ha sido llevado a cabo recientemente por Ravid,

$V < 1000 \text{ m/s}$

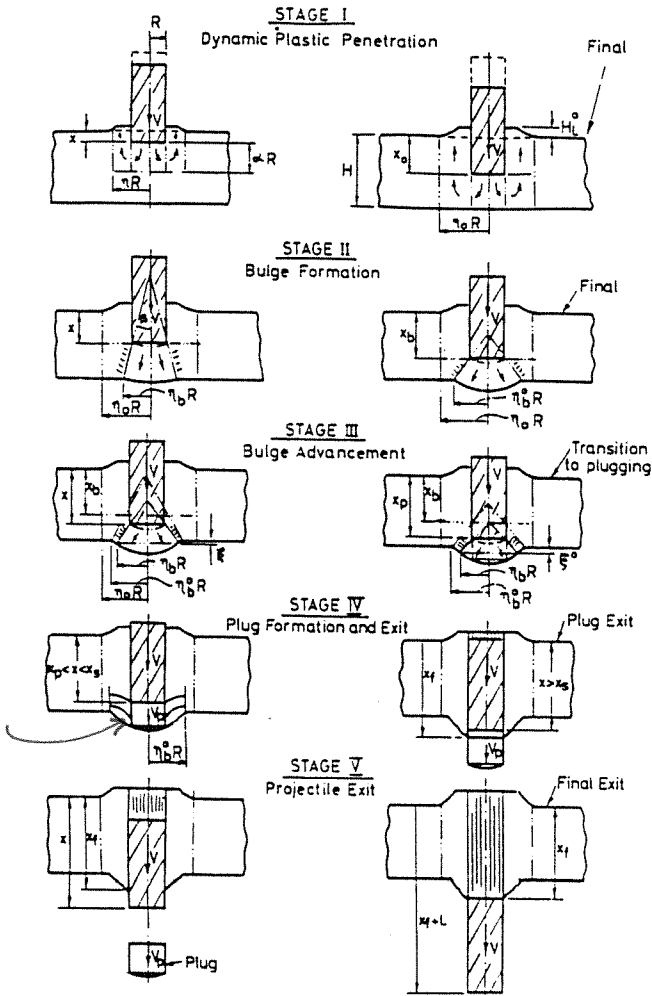


Fig.1.: Modelo de 5 etapas de Ravid y Bodner

Bodner y Holcman [5,6], mediante el uso de una metodología similar a la utilizada por Ravid y Bodner [3] en su modelo de cinco etapas. En el modelo de Ravid, Bodner y Holcman [5,6] se postulan unos campos de velocidad en el blanco y en el proyectil, definidos en diferentes zonas de los mismos, tal como puede observarse en la figura 2.

En esta figura se aprecia la presencia de unas zonas sometidas de la acción de las ondas de choque originadas en el proceso de impacto y de otras ondas de descarga debidas a la presencia de superficies libres que atenúan los efectos promovidos por las ondas de choque. La figura 2(a) ilustra las diferentes zonas de deformación consideradas en el proyectil y que corresponden a una zona aún no afectada por el proceso de impacto (zona I), a otra sometida a la acción de las ondas de choque (zona II) y cuyo radio decrece, desde el instante inicial, linealmente con el tiempo; la zona III identifica la parte del proyectil, anteriormente sometida al efecto de

ondas de choque y, actualmente, sometida a la acción de las ondas de descarga; la zona IV corresponde a aquella parte del proyectil que se expande lateralmente debido al impacto. De una manera similar podrían describirse las zonas correspondientes al blanco (figura 2 b).

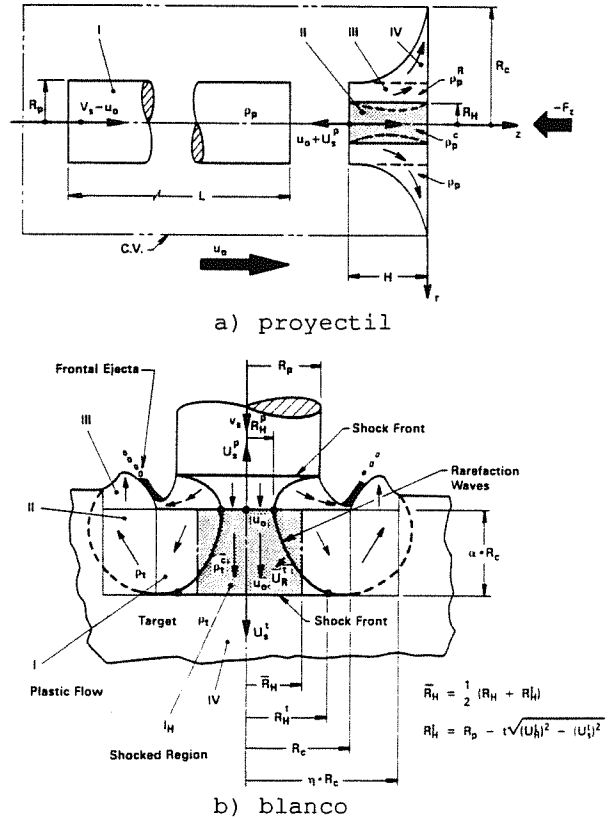


Fig.2.: Modelo de Ravid, Bodner y Holcman

La ecuación que se plantea en esta etapa, siguiendo las ideas de Tirosh y Kobayashi [4] y Ravid y Bodner [3] consiste en igualar la potencia neta perdida por el proyectil a la consumida en el blanco. Esta etapa finaliza cuando las ondas de descarga alcanzan al frente de la onda de choque que se propaga en el proyectil. En esta etapa comienza también la rotura de algunas zonas perimetrales del proyectil utilizándose, como criterio de rotura, que la deformación alcance un valor máximo. La comprobación del funcionamiento de este modelo para el tratamiento de las ondas de choque, ha sido recientemente llevada a efecto, mediante una técnica numérica, por O'Donoghe et al. [7].

Uno de los modelos más frecuentemente utilizado para contabilizar los fenómenos de erosión es el desarrollado por Tate [8,9] y recientemente mejorado por Jones, Gillis y Foster [10]. Básicamente el modelo se basa en la aplicación del segundo axioma de Newton al proyectil considerando que su

longitud disminuye con el tiempo. Es decir:

$$\rho_p l \dot{v} = - Y \quad (3)$$

donde:

ρ_p = densidad del proyectil

l = longitud actual del proyectil

\dot{v} = aceleración del proyectil

Y = presión en la interfase proyectil-blanco (=tensión de plastificación del material del proyectil)

Nótese que, en la ecuación anterior la longitud del proyectil es función del tiempo, y que su variación temporal (ver figura 3) es:

$$\dot{l} = v - u \quad (4)$$

donde v es la velocidad del proyectil y u la de la interfase blanco-proyectil.

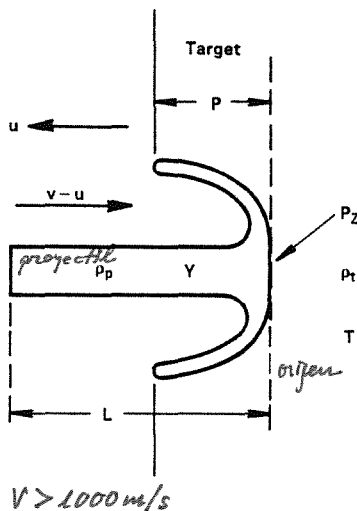


Fig.3.: Modelo de erosión de Tate

Adicionalmente a las dos ecuaciones anteriores, el modelo de Tate considera una ecuación de Bernoulli modificada del tipo:

$$\frac{1}{2} \rho_t u^2 + T = \frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y \quad (5)$$

donde:

ρ_t = densidad del blanco

T = resistencia ofrecida por el material del blanco (usualmente del orden de tres veces la tensión de plastificación)

El sistema de ecuaciones diferenciales (3), (4) y (5) puede ser integrado numéricamente pudiéndose obtener las evoluciones temporales de la velocidad del proyectil, de la interfase, la longitud de proyectil erosionada, etc.

En el caso de blancos formados por materiales cerámicos, Ravid, Bodner y Holcman [11] han propuesto recientemente un modelo basado en las siguientes etapas: en la primera se producen los fenómenos de ondas de choque utilizando la modelización analítica de Ravid, Bodner y Holcman [6]; la segunda etapa (erosión) termina cuando la onda reflejada en la cara posterior del blanco cerámico se encuentra con la zona del mismo que está en proceso de deformación plástica, suponiendo que en esta etapa se produce una pérdida de longitud del proyectil por unidad de tiempo idéntica a la producida en la etapa 1; en la etapa siguiente se supone que el proyectil continúa su movimiento, ya sin ningún tipo de erosión, en el seno del material cerámico fracturado. Como se observa, en este último modelo el fenómeno de erosión sólo se contabiliza en base a una hipótesis bastante discutible: en la etapa de erosión (etapa 2) la pérdida de longitud por unidad de tiempo es igualada a la producida en la etapa 1, en la que, según el modelo de Ravid, Bodner y Holcman [5], para el tratamiento de las ondas de choque, la pérdida de masa experimentada por el proyectil no se debe a ningún proceso de erosión propiamente dicho.

Por otra parte, el análisis de problemas de impacto entre cuerpos sólidos ha sido frecuentemente abordado empleando técnicas numéricas. Dichas técnicas, basadas generalmente en el método de los elementos finitos o de las diferencias finitas, requieren la subdivisión del continuo, cuyo comportamiento se desea estudiar, en pequeños sub-dominios. Estos pueden representar una zona dada del material (descripción Lagrangiana) o bien el espacio a través del cual fluye el material (descripción Euleriana). En general, para el caso de distorsiones moderadamente altas, se prefiere el empleo de una descripción Lagrangiana, que permite realizar un seguimiento más preciso de la historia del material durante su evolución. Por el contrario, para el caso de distorsiones excesivas, cuyo caso más extremo se puede identificar con el movimiento de un fluido, el empleo de una descripción Euleriana es considerablemente ventajoso. Por su parte, los esquemas de integración en el tiempo pueden clasificarse en dos grandes grupos, a saber, explícitos e implícitos. En los explícitos, el estado de desplazamiento y velocidades en el instante $n+1$, depende solamente del estado en el instante n , por lo cual la determinación del estado $n+1$ es prácticamente directa, con la economía computacional

que ello supone. En los métodos implícitos, no obstante, las variables de estado $n+1$ dependen tanto del estado n como de otras variables del estado $n+1$, lo cual conduce a una ecuación matricial no lineal que debe ser resuelta en forma iterativa. A pesar de requerir de un elevado número de operaciones por ciclo computacional, los métodos implícitos permiten el empleo de intervalos de tiempo relativamente grandes, a diferencia de los métodos explícitos, en que el intervalo de tiempo debe ser menor que el tiempo que tardan las ondas de compresión en recorrer la menor distancia entre nodos de la malla. Así, para problemas que permiten el empleo de intervalos de tiempo grandes (típicamente los problemas estructurales, en que la velocidad de deformación no supera 10^2 s^{-1}), los métodos implícitos se aplican con ventaja. Por otra parte, para problemas de carga dinámica o de impacto (en que la velocidad de deformación supera los 10^3 s^{-1}) en que se precisa del empleo de intervalos de integración pequeños, dichos métodos se vuelven excesivamente costosos, mientras que los métodos explícitos se tornan claramente ventajosos.

Estos códigos requieren también de una información completa acerca del comportamiento mecánico del material en el rango de las altas velocidades de deformación, si bien con frecuencia suele extrapolarse a dicho rango el comportamiento observado a velocidades más bajas con resultados relativamente satisfactorios. El problema de la rotura dinámica del material, sin embargo, no ha sido aún lo suficientemente comprendido para que este tipo de códigos puede emplearse con cierta fiabilidad para su predicción. Si bien se han desarrollado diversos modelos de rotura controlados por la nucleación y el crecimiento de microdefectos (microfisuras, microcavidades o microbandas de cortante adiabático) [12], dichos modelos tienen especial aplicación en el caso de rotura parcial, ya que aún no se ha llegado a considerar con la suficiente aproximación el proceso de coalescencia de microdefectos, que conduce a la rotura final del material.

En resumen, puede decirse que los códigos de análisis numérico de problemas de impacto pueden emplearse con cierta confianza siempre que no se alcance el umbral de la rotura del material. Por su parte, los modelos de rotura que se han desarrollado tienen su aplicación al caso de rotura incompleta.

2. COMPARACION ENTRE DIFERENTES TIPOS DE MODELOS PREDICTIVOS.

Con objeto de ilustrar lo anteriormente expuesto, en esta sección se analizan

dos problemas de impacto de un proyectil sobre diferentes tipos de blancos.

2.1. Impacto de un proyectil de acero sobre un blanco de aluminio.

La comparación que aquí se muestra corresponde a un caso de impacto a 400 m/s de un proyectil cilíndrico de radio $6,35 \text{ mm}$ de acero sobre un blanco de aluminio 2024-0 de espesor $19,05 \text{ mm}$. A dicha geometría corresponde un límite balístico experimental de 305 m/s . Este problema fue analizado por Elices et al. [13] utilizando el modelo de las cinco etapas propuesto por Ravid y Bodner [3] y un programa de ordenador basado en el método de las diferencias finitas.

Este caso que aquí se muestra cumple las hipótesis del modelo de Ravid y Bodner [3] puesto que, dada la diferente rigidez del acero y del aluminio, cabe esperar que el proyectil se deforme poco y que, por lo tanto, el proceso de penetración diste poco del que ocurriría caso de que el proyectil fuera indeformable.

En la figura 4 se muestran las configuraciones de proyectil y blanco en diferentes instantes; a la izquierda, utilizando la modelización numérica y a la derecha, utilizando el modelo de Ravid y Bodner [3]. Dada la axisimetría del problema solo se dibuja la mitad del conjunto proyectil-blanco. Los tiempos elegidos corresponden a diferentes etapas del proceso de perforación.

En la figura 5 se compara la evolución temporal de la cantidad de movimiento del proyectil utilizando ambas modelizaciones. La velocidad residual correspondiente al análisis numérico es de 282 m/s , mientras que aquella obtenida mediante el modelo de Ravid y Bodner es de 268 m/s . Ambos resultados muestran un buen acuerdo con el comportamiento observado experimentalmente.

Conviene resaltar el hecho de que la modelización numérica requirió unas tres horas de tiempo de proceso en un ordenador MICROVAX II mientras que la analítica solo necesitó un par de minutos.

2.2. Impacto de un proyectil de acero sobre un blanco cerámica-metal.

Para este apartado, se ha escogido un problema del que se dispone de resultados experimentales y que consiste en el impacto de un proyectil cilíndrico de acero de $12,7 \text{ mm}$ de diámetro que termina en una cabeza cónica de 60° , y que impacta sobre un blanco compuesto formado por una placa cerámica AD85, de $6,35 \text{ mm}$ de espesor, y otra, también del

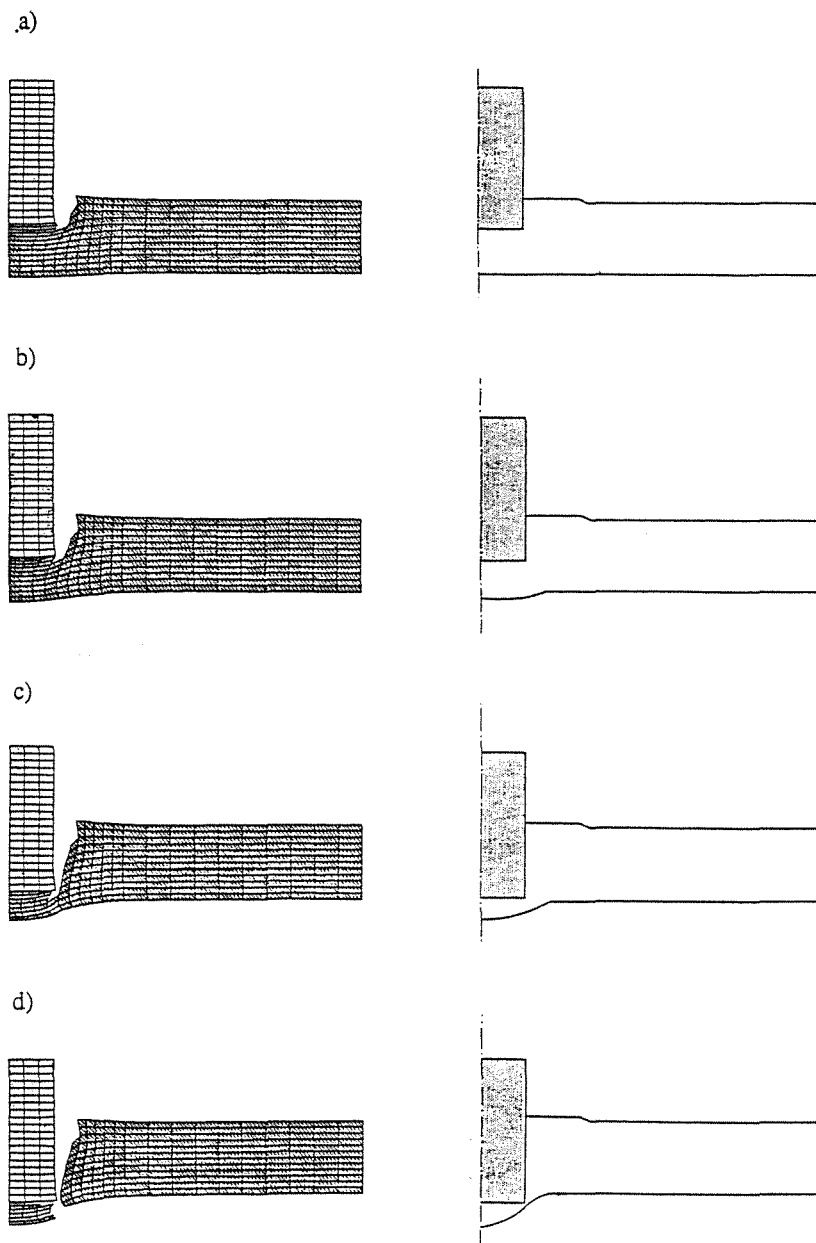


Fig.4.: Comparación de la configuración blanco/proyectil predicha por un análisis numérico (izquierda) y el modelo de Ravid y Bodner (derecha) para los siguientes tiempos: a) 18 μ s; b) 30 μ s; c) 54 μ s y d) 66 μ s.

mismo espesor, pero de acero SAE 4130. Para una velocidad de impacto de 650 m/s, Maysless et al. [14], obtuvieron que el proyectil era detenido y que su longitud había disminuido en 12 mm.

El análisis aquí realizado ha consistido en lo siguiente: se ha supuesto un proyectil cilíndrico, de longitud 38 mm., que presenta la misma masa que el considerado por Maysless et al. [14]; en una primera fase se ha aplicado el modelo de Ravid, Bodner y Holcman [5,6]

para la consideración de los fenómenos causados por las ondas de choque que se generan; en una segunda etapa se ha considerado la erosión del proyectil utilizando el modelo de Tate [8,9]; una vez que el proyectil ha atravesado la placa cerámica, habiendo reducido su longitud y velocidad, el proceso de perforación de la placa de acero es considerado utilizando el modelo de cinco etapas de Ravid y Bodner [3].

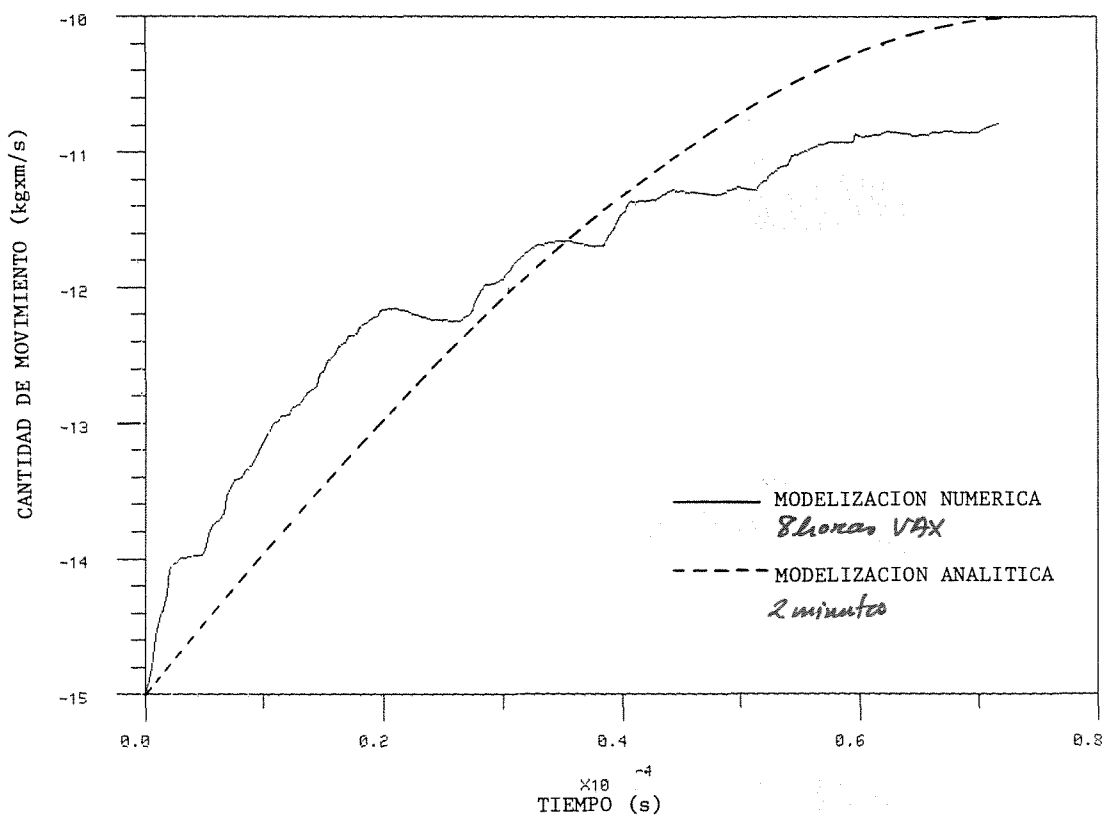


Fig.5.: Comparación de la evolución temporal de la cantidad de movimiento.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Etapas 1 : Ondas de choque (Ref. [5,6])

Duración: 2,13 μ s
 Velocidad de la interfase
 proyectil-blanco: 458 m/s
 Profundidad de penetración: 0,98 mm
 Máxima presión desarrollada:
 10,29 GPa

Etapas 2 : Erosión (Ref. [8,9])

Duración: 30,7 μ s
 Longitud del proyectil consumida:
 10 mm

Etapas siguientes : (Ref. [3])

Duración: 25.8 μ s
 Velocidad residual: 0 m/s

Los resultados anteriores están en consonancia con los experimentales obtenidos por Mayseless et al. [14] y, al igual que en el otro problema analizado, el tiempo de ordenador consumido fue de unos pocos minutos.

3. CONCLUSIONES

El grado de predicción de los modelos analíticos, para el tratamiento de problemas de impacto, que se proponen en la presente comunicación, posibilita su empleo como herramienta de trabajo para el diseño de blindajes, y consumen un tiempo de ordenador despreciable.

La utilización de métodos numéricos podría restringirse a aquellas situaciones en las que, por geometría del proyectil o blanco, o bien por comportamiento del material, no se cumplan las hipótesis básicas que los modelos analíticos consideran.

Conviene también resaltar el hecho de la aparente precisión del nuevo modelo analítico que se propone para el análisis de impacto de un proyectil sobre material cerámico y que considera el fenómeno de la erosión.

Por último, la necesidad de profundizar en el estudio y desarrollo de modelos analíticos queda patente a lo largo de esta comunicación.

4.REFERENCIAS

- [1] Awerbuch, A., y Bodner, S.R. (1974) "Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates" *Int. J. Solids Struct.* 10, pp.671-684.
- [2] Awerbuch, A., y Bodner, S.R. (1974) "Experimental investigation of normal perforation of projectiles in metallic plates" *Int. J. Solids Struct.* 10, pp.685-699.
- [3] Ravid, M. y Bodner, S. (1983) "Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles" *Int. J. Engng. Sci.* 21, pp.577-591.
- [4] Tirosh, J. y Kobayashi, S. (1976) "Kinetic and dynamic effects on the upper-bound loads in metal-forming Process" *J. App. Mech.* 43, pp.314-318.
- [5] Ravid, M., Bodner, S.R. y Holcman, I. (1987) "Analysis of very high speed impact" *Int. J. Engng. Sci.* 25, pp.473-482.
- [6] Ravid, M., Bodner, S.R. y Holcman, I. (1988) "Analysis of very high speed impact" *Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials, Vol.2* (Editado por C.Y. Chiem, H.-D. Kunze y L.W. Meyer). DGM Informationsgesellschaft Verlag, pp.855-863.
- [7] O'Donoghue, P.E., Bodner, S.R., Anderson, C.E. y Ravid, M. (1989) "Comparison of a high velocity impact model with numerical simulation" *Int. J. Impact Engng.* 8, pp. 289-301.
- [8] Tate, A. (1967) "A theory for the deceleration of long rods after impact" *J. Mech. Phys. Solids* 15, pp.387-399.
- [9] Tate, A. (1969) "Further results in the theory of long rod penetration" *J. Mech. Phys. Solids* 17, pp.141-150.
- [10] Jones, S.E., Gillis, P.P. y Foster J.C. (1987) "On the penetration of semi-infinite targets by long rods" *J. Mech. Phys. Solids* 35, pp.121-131.
- [11] Ravid, M., Bodner, S.R. y Holcman, I. (1989) "Application of two dimensional analytical models of ballistic penetration to ceramic armor" *Proceedings 11th Int. Symp. on Ballistic, Vol.II*, pp. TB-12/1-TB-12/8.
- [12] Curran, D.R., Seaman, L. y Shockey, D.A. (1987) "Dynamic Failure of Solids", *Phys. Reports*, 147, pp.254-388.
- [13] Elices, M., Cortés, R., Navarro, C. y Sánchez-Gálvez, V. (1989) "A Comparison between numerical techniques and analytical models for impact problems", *Proc. Int. Conf. Structures under Shock and Impact, SUSI'89*, Cambridge, Massachusetts.
- [14] Maysless, M., Goldsmith, W., Virostek, S.P. y Finnegan, S.A. (1987) "Impact on ceramic targets" *J. App. Mech.* 54, pp. 373-378.