

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRAYECTORIA BALÍSTICA DE UN PROYECTIL CONFORMADO POR EXPLOSIÓN

ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF THE BALLISTIC TRAJECTORY OF A EXPLOSIVELY FORMED PROJECTILE

Fernando D. Quinodoz, Sebastián E. Moreira y Edgardo A. Serafin

*Facultad de Ingeniería del Ejército, Universidad de la Defensa Nacional, Av. Cabildo 15 (C1426AAA)
C.A.B.A. - República Argentina, sicanlab@fie.undef.edu.ar, <http://www.fie.undef.edu.ar>*

Palabras clave: Proyectoil conformado por explosión, patrón de flujo, resistencia aerodinámica, trayectoria.

Resumen. Se presenta un estudio sobre la trayectoria balística de un proyectil conformado por explosión (EFP por sus siglas en inglés). En el estudio se analiza el problema utilizando como herramientas un software comercial para dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) y la programación en un lenguaje interpretado de alto nivel. Se simula el perfil aerodinámico del proyectil sometido a velocidades subsónicas, transónicas y supersónicas con el software ANSYS Fluent y se analizan resultados fluido-dinámicos relevantes, como el patrón de flujo alrededor del proyectil, presiones externas y ondas de choque normales y oblicuas generadas según los diferentes regímenes de velocidad. Los resultados obtenidos, esencialmente los relacionados a la resistencia aerodinámica, alimentan un programa elaborado en código Matlab para obtener resultados sobre la performance del proyectil conformado por explosión, refiriéndonos con esto al alcance estimado, la atenuación de la velocidad del proyectil y el tiempo de vuelo. En los sistemas de armas integrados por EFP, el objetivo deseado es la conformación de un proyectil aerodinámicamente estable que vuele a objetivos distantes. El estudio presentado otorga herramientas a la ingeniería de diseño de los EFP que coadyuva al logro del objetivo mencionado.

Keywords: Explosively formed projectile, flow pattern, aerodynamic drag, trajectory.

Abstract. A study of the ballistic trajectory of an Explosive Formed Projectile (EFP) is presented. The study analyzes the problem using different tools like commercial computational fluid dynamics (CFD) software and programmes in a high-level interpreted language. The aerodynamic profile of the projectile subjected to subsonic, transonic and supersonic speeds is simulated with the ANSYS Fluent software and relevant fluid-dynamic results are analyzed, such as the flow pattern around the projectile, external pressures and normal and oblique shock waves generated in accordance to different speed regimes. The results, essentially those related to aerodynamic resistance, feed a program elaborated in Matlab code in order to obtain results on the performance of the projectile formed by the explosion, this referring to the estimated range, the attenuation of the speed of the projectile and the flight time. The desired goal of an EFP integrated weapon system is the formation of aerodynamically stable projectiles that can flies to distant targets. The presented study provides tools for the design engineering of EFPs that contributes to the achievement of the aforementioned desired goal.

1. INTRODUCCIÓN

El “conjunto del sistema” proyectil conformado por explosión (Figura 1) está constituido generalmente por un tren de iniciación, un explosivo confinado por un cuerpo contenedor y un disco delgado curvado denominado *liner*. La energía liberada producto de la detonación moldea el liner en alguna forma de proyectil siendo dependiente esta del tipo de explosivo empleado, el confinamiento presentado por el contenedor y la configuración del disco. La forma, la velocidad y el rendimiento del EFP dependen de factores geométricos y materiales (Carleone, 1993). Los contornos del liner, las dimensiones físicas de la carga explosiva (relación largo-diámetro

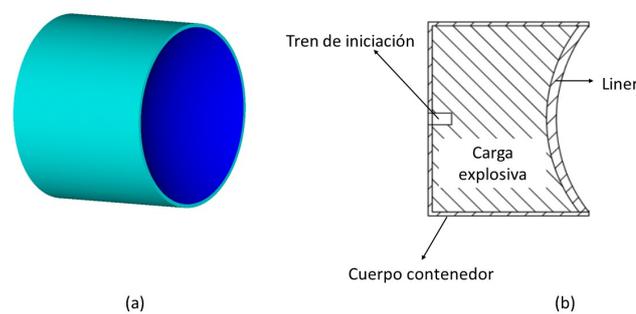


Figura 1: Estructura del dispositivo. (a) Representación del dispositivo EFP, (b) Corte transversal del sistema y mención de componentes.

(L/D)), la configuración del confinamiento y la técnica de iniciación del explosivo son algunos de los factores geométricos de interés. Los factores materiales dependen de la estructura, propiedades y condiciones de procesamiento durante la fabricación del liner, el cuerpo contenedor y el explosivo (Matuska, 1984). El cuerpo contenedor generalmente es de acero debido a su costo relativamente bajo, alta resistencia y alta densidad. Sin embargo, también se pueden usar otros materiales, siempre que la masa sea suficiente para proporcionar el confinamiento necesario. Las propiedades explosivas de importancia son la densidad de la carga, la velocidad de detonación y la energía explosiva liberada (G.Cullis, 1992). El EFP es un tipo de carga

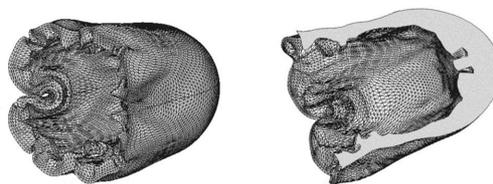


Figura 2: Proyectil conformado obtenido por simulación.

conformada, el cual debe presentar capacidades de alta penetración de estructuras blindadas y efectividad de impacto a distancias variables. Aquel *liner* conformado en un proyectil que logre

desarrollar una mayor velocidad, conducirá a un incremento del valor de energía de impacto en el blanco y, consecuentemente, a una penetración mayor (V.Sharma, 1996). La relación L/D del proyectil es un parámetro muy importante respecto de la capacidad de penetración. Cuanto mayor sea esta relación, más profunda será la penetración en el blanco (W.Lanz, 1992). A modo de paso previo e indispensable para presentar el análisis de la trayectoria balística, se simula la conformación de un proyectil EFP en 3D con un software de CFD y un hidrocódigo acoplado. A partir de lo mencionado, se obtiene una geometría genérica, siendo ésta la seleccionada para analizar su vuelo y extraer conclusiones (Figura 2). En este estudio se presentan simulaciones numéricas para obtener resultados sobre la performance del proyectil en vuelo.

Las herramientas utilizadas en este estudio son las disponibles en el SiCaNLab, a saber: ANSYS FLUENT® para la simulación del flujo externo y un código de alto rendimiento en Matlab® para la definición de trayectorias y alcances del proyectil.

2. RESISTENCIA Y SUSTENTACIÓN DEL EFP

El material del proyectil referenciado es cobre electrolítico con una densidad inicial de $8,9 \frac{g}{cm^3}$ y un punto de fusión de $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ (Phillips, 1991). Las dimensiones del EFP son semejantes

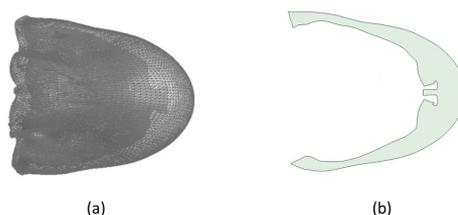


Figura 3: EFP. (a) Geometría 3D, (b) Geometría 2D.

a la de un proyectil de 40 mm y tiene una forma de campana cilíndrica extendida. En busca de la optimización de los recursos disponibles se extrae una geometría representativa en dos dimensiones (2D) del proyectil logrado (Figura 3), producto de la simulación de la conformación. De

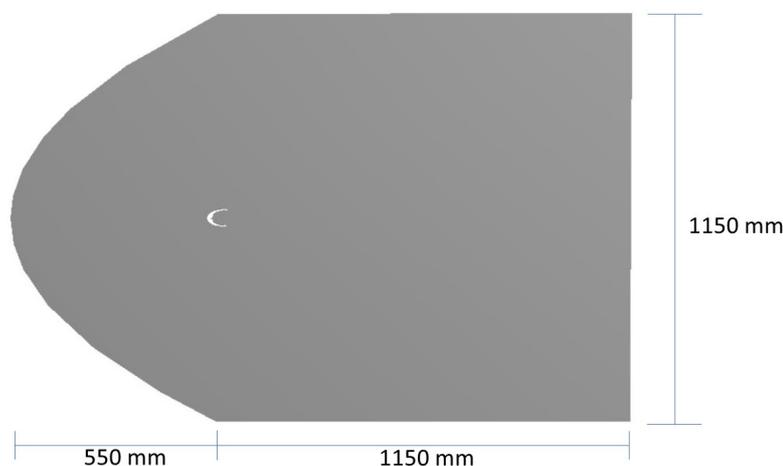


Figura 4: Dominio fluido simulado.

esta manera, se reducen los tiempos de cálculo y la solución es representativa del fenómeno. El dominio fluido simulado es el denominado como "de nariz". Para este estudio se utiliza un túnel de viento virtual en el cuál se inserta el perfil a estudiar (Figura 4). Para generar el mallado del

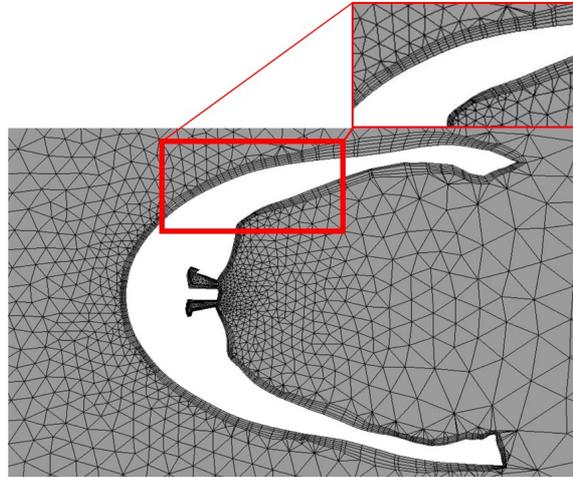


Figura 5: Discretización geométrica: malla triangular estructurada no-homogénea.

dominio seleccionado y atendiendo a la complejidad e irregularidades presentadas en el perfil del proyectil se elige una malla triangular estructurada no uniforme. Asimismo, para poder captar adecuadamente el fenómeno de capa límite en superficie se diseña una malla estructurada evolutiva desde el perfil hacia el fluido denominada "inflation" (Figura 5). Se logra así, una perfecta adaptación de la discretización física a la geometría estudiada y una solución de detalle. El mallado presentado fue sometido al análisis de convergencia de malla. Siendo este, el optimizado, al no detectarse variación de los resultados con la continuidad de su refinado. En la búsqueda de la obtención de la sustentación y de la resistencia del perfil bidimensional es que se somete el mismo a regímenes de velocidades subsónicas, transónicas y supersónicas. Para

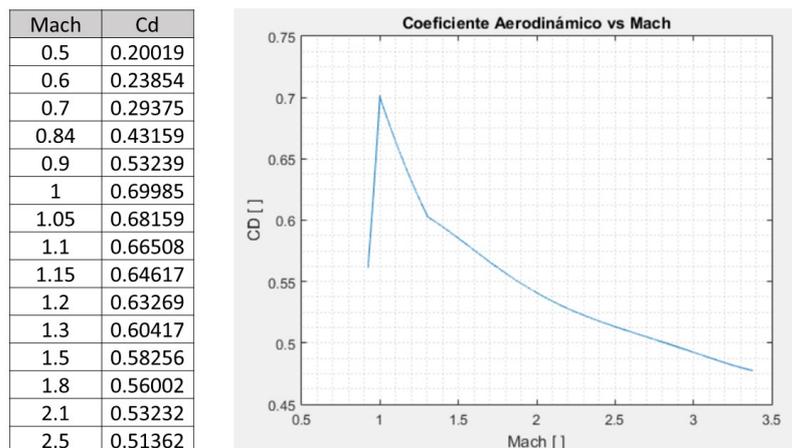


Figura 6: Resultados del coeficiente de resistencia obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en ANSYS Fluent® para distintos números de Mach.

predecir el patrón de flujo se emplean las ecuaciones promediadas de Reynolds Navier-Stokes

(RANS por sus iniciales en inglés de la denominación: Reynolds Averaged Navier-Stokes) con el modelo de turbulencia de 2 ecuaciones GEKO (Generalized $k - \omega$). Se utiliza un solucionador basado en la densidad ya que este enfoque se usa principalmente para flujos compresibles de alta velocidad.

El esquema de discretización usado para la cantidad de movimiento es el de aguas arriba de segundo orden (second order upwind scheme por su nombre en inglés). Para la presión se emplea el esquema de segundo orden y para turbulencia el de aguas arriba de primer orden (first order upwind scheme por su nombre en inglés). De esta manera, se obtienen los valores de resistencia aerodinámica en función de los diferentes números de Mach, según la Figura 6. En general, el patrón típico de flujo supersónico alrededor de los EFP (Figura 7) es muy

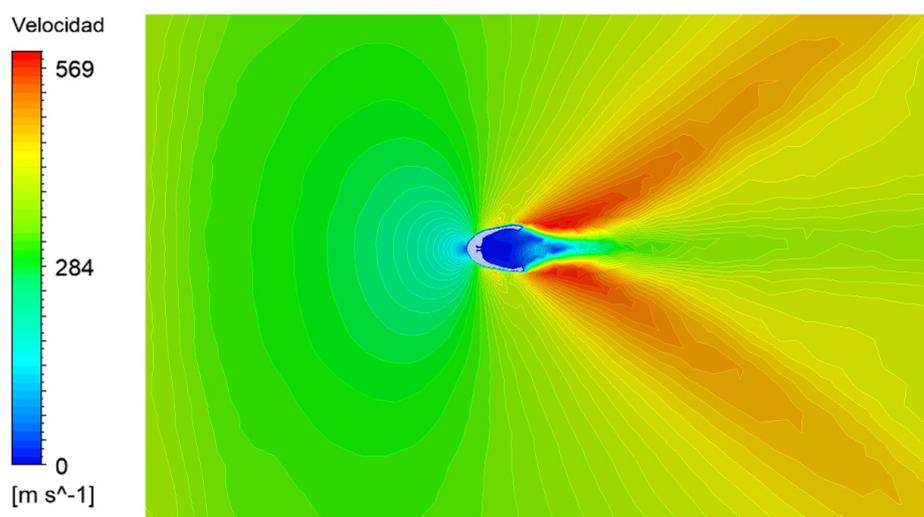


Figura 7: Campo de Velocidades calculado por ANSYS Fluent® alrededor del perfil 2D.

complicado. La Figura 8 ilustra la onda de choque generada por la nariz del EFP, así como la producida por el comienzo de la región de separación. Las dos mayores áreas de interés son las

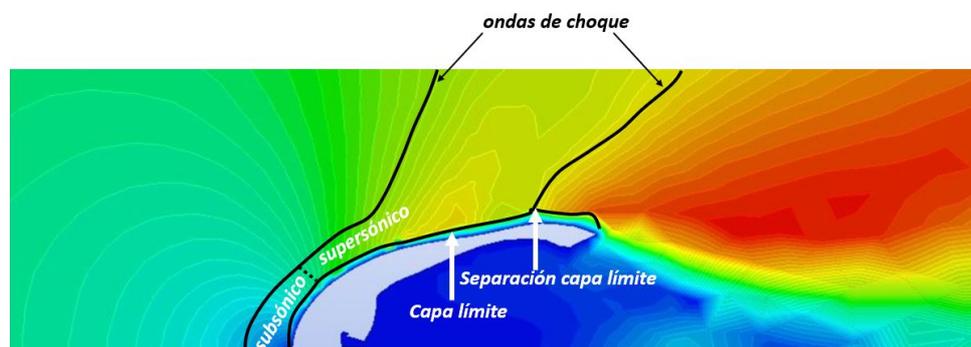


Figura 8: Típico patrón de flujo alrededor de un EFP.

medidas de la región del flujo separado, la cuál es función del número de Mach y del ángulo de ataque del proyectil; y la presión dinámica del flujo, en las salientes posteriores de la geometría, la cuál está fuertemente influenciada por la dureza y la interacción de las ondas de choque que con el aire que deben atravesar (Carleone, 1993).

3. PERFORMANCE DEL PROYECTIL CONFORMADO POR EXPLOSIÓN

Al no ser un proyectil estabilizado giroscópicamente, el efecto Magnus y la fuerza de Coriolis no influyen en su trayectoria balística. La rotación de la tierra y su curvatura son perturbaciones extrínsecas imperceptibles debido al relativo corto alcance del proyectil. Por ende, el modelo utilizado para conocer la performance balística del proyectil considera dos grados de libertad (2DOF), suficientes para su estudio. Se podría pasar a un modelo de 3DOF contemplando la componente del viento transversal a la trayectoria, pero es un estudio que excede a lo que se intenta demostrar en el presente trabajo. El sistema de ecuaciones diferenciales con 2DOF que modelan su trayectoria queda definido:

$$\frac{dx}{dt} = v \cos(\tau) \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin(\tau) \quad (2)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = -\frac{g \cos(\tau)}{v} \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dt} = v - (m_p F_D + g \sin(\tau)) \quad (4)$$

Donde:

v es la velocidad instantánea, τ es el ángulo instantáneo de inclinación, g es la fuerza de gravedad, m_p la masa del proyectil y F_D la fuerza aerodinámica de Drag o Retardación, definida por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S_{ref} C_D(M) \quad (5)$$

En la misma, ρ es la densidad instantánea del aire, S_{ref} la superficie de referencia o equivalente del proyectil y C_D es el coeficiente aerodinámico de retardación o de Drag. El valor del coeficiente aerodinámico de retardación, función del número de Mach, depende de la fricción de su superficie con el medio que lo rodea (C_{Df}), la influencia de las ondas de choque sobre la forma de su ojiva en las zonas de transición y supersónica (C_{Do}) y la zona de baja presión que se forma en la parte posterior del proyectil (C_{Db}).

$$C_D = C_{Df} + C_{Do} + C_{Db} \quad (6)$$

4. RESULTADOS

Esta sección muestra el resultado de la performance balística del proyectil estudiada. Es determinante asumir que el EFP permanecerá compacto y simétrico durante el vuelo, cumpliendo un rol fundamental para ello, la parte posterior del proyectil la cual deberá otorgar estabilidad y equilibrio.

Se estipula una velocidad inicial de cálculo de $1150 \frac{m}{s}$, la cual fue obtenida de simulaciones sobre la conformación del EFP. Se considera la estádia en una fase de vuelo estable donde el proyectil se encuentra en su forma definitiva y su vuelo estabilizado. Consecuentemente, en este periodo el EFP se somete a una invariable resistencia al aire y la velocidad decrece lentamente; atendiendo siempre a una correcta conformación del proyectil. El proyectil no tiene un buen perfil aerodinámico si lo comparamos con los perfiles de otros tipos de proyectiles balísticos (de bajos calibre, de artillería, etc). La relación entre la masa del proyectil y su superficie equivalente

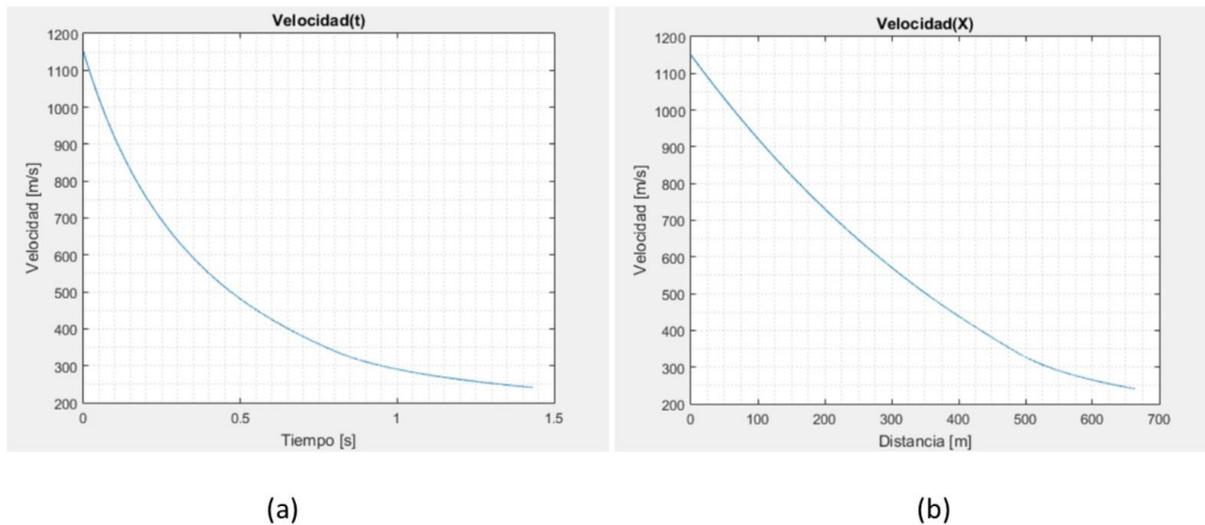


Figura 9: Variación de la velocidad del EFP: (a) En función del tiempo, (b) En función de la distancia.

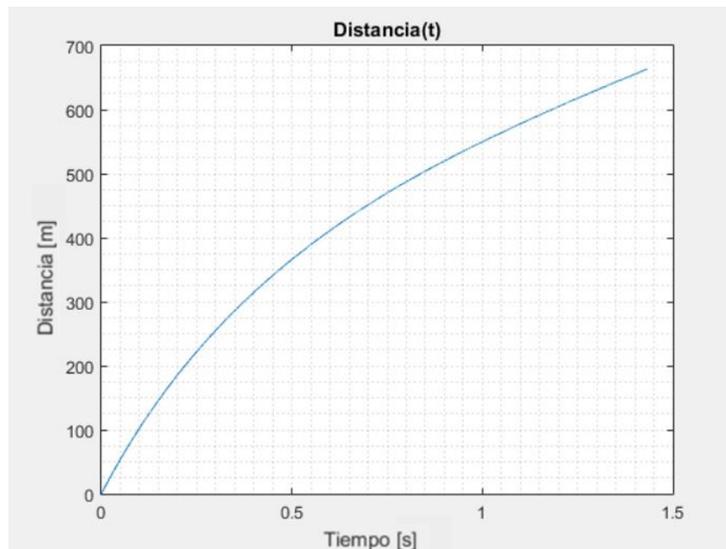


Figura 10: Alcance del proyectil en distancia respecto del tiempo.

o de referencia, es bajo. Esto se debe a que el material del EFP (cobre) tiene una densidad menor a otros proyectiles de materiales más densos (plomo, tungsteno) y a que cuenta con una cavidad interior debido a su proceso de conformación. Estos factores influyen negativamente en su desempeño balístico y hacen que pierda velocidad rápidamente (Figura 9). Sin embargo, al contar con una velocidad inicial elevada (superior a Mach 3) hasta cierta distancia (Figura 10) tiene efectos devastadores sobre vehículos livianos. Para la simulación balística se toma un lanzamiento horizontal (ángulo inicial igual a 0°) a 2 metros de suelo, y parando la misma hasta que su trayectoria toca al mismo.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del tiempo los diseños de los EFP se vieron forzados a evolucionar atendiendo a los requerimientos crecientes presentados por los blancos a batir (e.g. mejora en tecnologías de blindajes). Esta evolución radica entre algunos otras variables a considerar, en la reducción del

coeficiente aerodinámico de arrastre y una mayor longitud de penetración efectiva.

Con el estudio presentado se pretende mostrar como a partir de un proyectil conformado (genérico no optimizado en su geometría), se puede realizar una simulación numérica que contribuye al análisis de la performance balística del mismo.

Conocer variables como velocidades de atenuación del proyectil, velocidad respecto de la distancia alcanzada y alcance en función del tiempo, brindan herramientas robustas que permiten determinar la efectividad respecto del blanco objetivo que se debe alcanzar.

REFERENCIAS

- Carleone J. *Tactical Missile Warheads*, volumen 155- Progress in Aeronautics and Astronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1993.
- G.Cullis I. Experiments and modeling in dynamic materials properties: Explosively formed projectile research in a european collaborative forum. *13th Int. Symp. on Ballistics, Stockholm*, página 457–464, 1992.
- Matuska D.A. Hull users' manual. *AFATL-TR- 84-59*, 1984.
- Phillips T. Liner materials:resources, processes, properties, costs, and applications. *MDA972-90.C.0044*, 1991.
- V.Sharma P.Kishore S. An analytical approach for modeling efp formation and estimation of confident effect on velocity. *16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco*, página 585– 595, 1996.
- W.Lanz W. Penetration limits of conventional large caliber anti tank guns/kinetic energy projectiles. *13th Int. Symp. on Ballistics, Stockholm*, página 225–233, 1992.