

## ANÁLISIS DE PROPIEDADES BALÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

### BALLISTIC PROPERTIES ANALYSIS OF EXPLOSIVES USING NUMERICAL METHODS

**Sebastián Moreira, Fernando Quinodoz, Norman Serra, Elvio Heidenreich y Edgardo Serafín**

*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 - <https://www.fie.undef.edu.ar>*

**Palabras clave:** Efecto balístico de un explosivo, ondas de choque, distribución de fragmentos, balística terminal.

**Resumen.** El efecto balístico de un explosivo resulta de la interacción de los efectos de las ondas de choque, de expansión y de compresión, de los productos de detonación y del sólido inerte en presencia. Las ondas se suceden dentro de un explosivo con amplitudes cada vez menores a lo largo de un periodo de tiempo breve. La detonación de los proyectiles u ojivas con carga explosiva da como resultado la formación de un gran número de fragmentos de diferentes masas y geometrías. En este estudio se presenta un análisis de la balística terminal del proyectil HE-M1 105 mm mediante las teorías de Mott, Gurney-Sarmousakis, Gold-Baker y Grady-Kipp para determinar la masa promedio de los fragmentos. Luego con este parámetro estadístico, se aproxima la distribución probable de fragmentos a través de la distribución de Held. Para validar estos resultados se toman curvas de fragmentación experimentales y datos obtenidos de una simulación 3D con el software ANSYS Autodyn<sup>®</sup>. Esta comparación permite determinar que los parámetros computacionales de fragmentación obtenidos por simulación pueden predecir apropiadamente las características de ruptura de un proyectil u ojiva.

**Keywords:** Ballistic effect of an explosive, shock waves, fragment distribution, terminal ballistics.

**Abstract.** The ballistic effect of an explosive results from the interaction of the effects of shock, expansion and compression waves of the detonation products against a standing inert solid. Within the explosive, waves successively occur with decreasing amplitude during a short period of time. The detonation of projectiles or explosives warheads results in the formation of a large number of fragments of different masses and geometries. An analysis of the terminal ballistics of a 105mm HE-M1 projectile, using the theories of Mott, Gurney Sarmousakis, Gold-Baker and Grady-Kipp to initially determine the mass average of the fragments, is presented. Then, with the obtained statistical parameter, the probable distribution of fragments is approximated through the Held distribution. Results are validated with experimental fragmentation curves and data obtained from a 3D simulation with ANSYS Autodyn<sup>®</sup> software. This comparison allows to determine that the computational fragmentation parameters obtained by simulation can properly predict the rupture characteristics of a projectile or warhead.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las proyectiles aprovechan el efecto destructivo del choque de las ondas explosivas producidas por la detonación de su carga. En unos  $10 \mu s$ , se generan unos  $1000 l$  de gas extremadamente comprimidos por kilogramo de explosivo (a una presión cercana a los  $100 kbar$ ). La fuerza de expansión de estos gases altamente comprimidos produce una corriente de gas que empuja el aire como una onda de choque.

De esta manera, la onda de choque consecuencia de la explosión provoca la formación de un gran número de fragmentos de diferentes masas y geometrías. Estos fragmentos absorben una porción de la energía proveniente de la carga explosiva en la forma de energía cinética, que los lleva a grandes distancias hasta el objetivo. La distribución de la masa de los fragmentos depende de la geometría del proyectil, el espesor del cuerpo del proyectil, el material del cuerpo, sus características mecánicas y el tratamiento térmico, así como también; el tipo, diámetro y longitud de la carga explosiva (Carleone, 1993).

La determinación del rendimiento de proyectiles requiere equipos de medición muy complejos y el proceso de medición es costoso. Entre los métodos de medición podemos enunciar el del pozo de troceo, en el cuál se obtienen la distribución de masa y tamaño de los fragmentos; el espiral de Bourges y empleo de sensores, en los cuáles se mide la distribución espacial y velocidad de los fragmentos en su zona de acción.

La capacidad para realizar la predicción del rendimiento de los proyectiles en las fases preliminares es determinante para continuar con el diseño teniendo en cuenta el efecto necesario a lograr en el blanco.

Existen abordajes analíticos y numéricos que permiten el análisis de la fenomenología desarrollada. En este documento se presentan ambos y se comparan a la luz de la determinación de la balística terminal del proyectil High Explosive HE M1 105 mm.

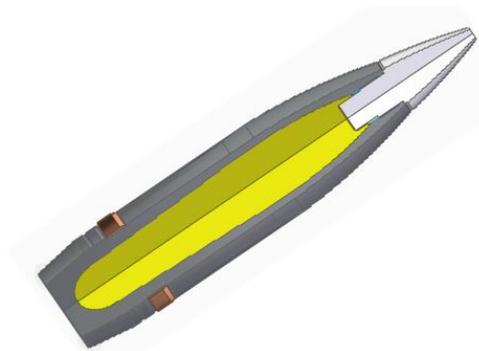


Figura 1: Proyectil High Explosive HE M1 105 mm.

La teoría de la fragmentación tiene una base estadística y empírica. Los trabajos de Mott y Gurney sobre la fragmentación se realizaron durante la 2da guerra Mundial, aunque dichas expresiones se siguen empleando con una importante aproximación en la actualidad. En el estudio balístico terminal del HE-M1, mediante las teorías de Mott, Gurney-Sarmousakis, Gold-Baker y Grady-Kipp, se pretende determinar la masa promedio de los fragmentos. Luego, con este parámetro estadístico, se aproxima la distribución probable de fragmentos de masa  $m$  a través de la distribución de Mott. Por la teoría de Held se obtiene una distribución ajustando el valor de dos constantes empíricas. Para comparar los resultados se tomaron dos curvas de fragmentación experimentales presentes en los trabajos de John Dehn (Dehn, 1981) y Berko Zecevic (Zecevic et al., 2004). En cuanto al abordaje numérico, se emplean códigos computarizados de meca-

nismos continuos en tres dimensiones; a menudo llamados códigos de propagación de ondas, códigos hidrodinámicos o hidrocódigos (C.E.Anderson, 1987). Las herramientas mencionadas permiten la simulación de eventos que involucran a los proyectiles con presiones extremas (en el orden de 50 GPa) durante un extremadamente corto periodo de tiempo ( $\mu s$ ). Las herramientas utilizadas en este estudio son las disponibles, a saber: ANSYS Autodyn® para la simulación de la detonación y fragmentación. En estos casos, los cálculos pueden proporcionar información detallada que de otra manera no sería obtenible.

## 2. MÉTODOS ANALÍTICOS

El desarrollo de los métodos analíticos que se presentan, responde a la clasificación de fragmentación de cabezas de guerra por el comportamiento teórico de las velocidades de sus fragmentos. En relación a esto, nos ocuparemos de los fragmentos naturales. Los mencionados son aquellos que resultan de la desintegración del cuerpo del proyectil (sin una preforma previa) cuando la carga explosiva es detonada.

Si la carga explosiva es detonada en un cuerpo de proyectil constituido de material homogéneo, dicho cuerpo recibirá el impulso de los gases generados por la sustancia explosiva (Elek y Jaramaz, 2009). La expansión radial provocará la fractura en diferentes fragmentos naturales dependiendo de la dureza, fragilidad, tamaño de grano del material y el poder de la onda de choque, magnitud del impulso explosivo, como también, de la temperatura inicial del proyectil. La distribución de masa de proyectiles con fragmentación natural es generalmente descripta por la fórmula de Mott. Sin embargo, esta fórmula ofrece una limitada descripción del fenómeno ya que excluye los fragmentos pequeños. Existe otro tipo de descripción estipulada por Held, la cuál es más general y precisa. En el análisis que se presenta se determina la masa promedio de los fragmentos por medio de la ecuación de Mott, la ecuación de Gurney-Sarmousakis, la ecuación de Gold Baker y Grady-Kipp.

### Ecuación de Mott

$$\mu = B_M^2 t^{\frac{5}{3}} d_{expl} \left( 1 + \frac{t}{d_{expl}} \right)^2 \quad (1)$$

donde  $\mu$  es el promedio de la masa de los fragmentos,  $B_M$  la Constante de Mott,  $t$  el espesor del cuerpo del proyectil y  $d_{expl}$  el diámetro equivalente del explosivo.

En la Tabla 1 se exponen los valores de la constante de Mott para diferentes explosivos. El espesor equivalente del cuerpo del proyectil y el diámetro equivalente de la carga se obtienen con las expresiones (2) y (3):

Altos explosivos	$B_M$
TNT	0.0779
Composición B	0.0554
RDX	0.0531
Pentolita	0.0808

Tabla 1: Valores de la constante de Mott para diferentes explosivos.

$$d_{expl} = \sqrt{\frac{V_{expl} 4}{\pi d_{expl}}} \quad (2)$$

$$t = \frac{1}{2} \left( \sqrt{d^2 + \frac{4 V_{cuerpo}}{\pi L_{expl}}} - d \right) \quad (3)$$

Ecuación de Gurney-Sarmousakis

$$\mu = A_{G_S}^2 \left( \frac{t}{d_{expl}} \right)^2 (d_{expl} + t)^3 \left( 1 + \frac{C}{2M} \right) \quad (4)$$

donde  $\mu$  es el promedio de la masa de los fragmentos,  $A_{G_S}$  la constante de Gurney-Sarmousakis (depende del explosivo),  $t$  el espesor del cuerpo del proyectil,  $d_{expl}$  el diámetro equivalente del explosivo,  $C$  la masa del explosivo y  $M$  la masa del cuerpo del proyectil.

Ecuación de Gold-Baker

$$\mu = \sqrt{\frac{2}{\rho_f}} \left( \frac{\sigma_R}{\gamma_M} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{r_{expl}}{v_r} \right)^3 \quad (5)$$

siendo  $\rho_f$  la densidad del material del cuerpo del proyectil,  $\sigma_R$  el límite de esfuerzo a la rotura del material,  $r_{expl}$  el Radio de la carga explosiva,  $\gamma_M$  la constante empírica de Mott y  $v_r$  la Velocidad de expansión radial inicial de los fragmentos del proyectil.

Ecuación de Grady-Kipp

$$\mu = A \rho_f t^3 \left( \frac{R_0}{t} \right)^{\frac{2 S_G}{\alpha_G}} \left( \frac{\sigma_R}{t^{2-\alpha_G} \rho_f v_r^2} \right)^{\frac{S_G}{\alpha_G}} \quad (6)$$

donde  $\mu$  es el promedio de la masa de los fragmentos,  $A$  es la Relación de largo-ancho de los fragmentos,  $\rho_f$  es la densidad del material del cuerpo del proyectil,  $t$  es el espesor equivalente del cuerpo del proyectil,  $R_0$  es el radio nominal del proyectil,  $\sigma_R$  es el límite de esfuerzo a la rotura del material,  $S_G$  es la constante empírica y su valor se estipula en 2 o 3, dependiendo de  $t$ ,  $\gamma_G$  es la constante empírica ( $2 < \gamma_G < 3$ ) y  $v_r$  la velocidad de expansión radial inicial de los fragmentos del proyectil.

## 2.1. Distribución de la masa de los fragmentos

Se emplea el valor estadístico empírico obtenido por cualquiera de las cuatro teorías anteriores, para luego determinar la distribución de la cantidad de fragmentos en función de su masa. Se emplea para ello las expresiones de Held.

$$m = \frac{dM_{(N)}}{dn} = M_0 B \lambda N^{\lambda-1} e^{-B N^\lambda} \quad (7)$$

integrando en los  $n$  fragmentos, se obtiene:

$$M_{(N)} = M_0 \left( 1 - e^{-B N^\lambda} \right) \quad (8)$$

donde  $m$  es la masa de los fragmentos en función de la cantidad acumulada considerada,  $N$  la cantidad acumulada de fragmentos hasta masa  $m$ ,  $M_0$  la masa total de envuelta,  $M_{(n)}$  la masa

acumulada de fragmentos,  $B$  la constante  $\sim 0,0011$  y  $\lambda$ : la constante  $\sim 0,75$ .

La ecuación (7) demuestra que la cantidad total de fragmentos reales (incluyendo los de masas infinitésimas) del proyectil tiende a infinito si consideramos todos ellos. Por eso el valor  $M_{(n)}$  determina el total de la masa acumulada de los fragmentos significantes. Esta cantidad de fragmentos relevantes se puede aproximar mediante:

$$N_0 = \frac{M_0}{2\mu} \quad (9)$$

Empleando los valores promedios obtenidos por las teorías de Mott, Gurney, Gold y Grady, se obtiene la cantidad de fragmentos posibles que se producen por encima de una masa  $m$  cualquiera.

$$N_{(M)} = N_0 e^{\frac{m}{\mu}} \quad (10)$$

Para el caso de las ecuaciones de Held, la variable de entrada es la cantidad de fragmentos y se obtiene la masa límite mínima para esa cantidad. Se debe tener en cuenta que la distribución de masa es un ajuste a la distribución de masa encontrada experimentalmente. La distribución de masa depende la geometría, tal como el diámetro y largo de la carga explosiva, el espesor del cuerpo del proyectil, y del comportamiento del material del cuerpo contenedor y el tipo de alto explosivo.

### 2.1.1. Velocidad inicial de los fragmentos

La teoría de la velocidad de los fragmentos fue estudiada por Gurney, y esta considera la hipótesis del proyectil como un cilindro. La velocidad inicial de los fragmentos producto de la detonación es calculada según:

$$V_{(oF)} = G \sqrt{\frac{M}{C} + \frac{1}{2}} \quad (11)$$

donde  $M$  es la masa del cuerpo del proyectil,  $C$  la masa del explosivo,  $G$  la constante de Gurney,  $\Delta E$  el calor de Explosión (característica del explosivo) y  $M_{Molec}$  la masa molar del explosivo.

$$G = \sqrt{2 \Delta e} \quad (12)$$

$$\Delta e = \frac{\Delta E C}{M_{Molec}/1000} 1000 \quad (13)$$

## 3. RESOLUCIÓN NUMÉRICA

El proceso de fragmentación del proyectil es llevado a cabo mediante un programa dinámico en tres dimensiones (3D) utilizando el método de elementos finitos. Inicialmente, se consolida

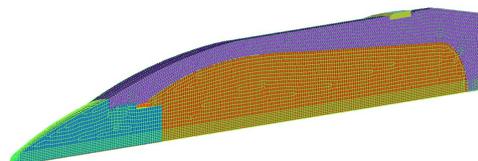


Figura 2: Malla estructurada hexaedrica de la geometría del proyectil.

el modelo CAD del proyectil según diseño original, para luego generar una malla estructurada

hexaédrica de dimensiones aproximadas de 1x1 mm por elemento realizada en NASTRAM<sup>®</sup>. Luego de la definición de los materiales y la asignación de las condiciones iniciales y de contorno llevadas a cabo en el entorno Workbench, el conjunto mencionado se transfiere al solver Autodyn 3D<sup>®</sup> para resolver el modelo. La sustancia energética y medio circundante, aire, se modelan utilizando el enfoque Euleriano multimaterial, el cual permite simular un medio con diferentes materiales. Se emplea, además, un procesador Lagrangeano para describir el comportamiento de las partes metálicas del proyectil. Se define el acoplamiento para resolver el problema de la interacción fluido-sólido. Para describir la expansión adiabática de los produc-

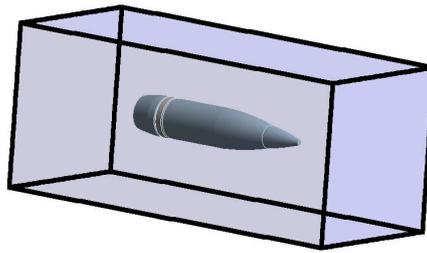


Figura 3: Dominio acoplado Euler-Lagrange resolutivo.

tos de detonación se recurre a la ecuación de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL). Esta ecuación representa la presión como función del volumen y la energía. La respuesta dinámica del cuerpo de acero, la espoleta y el aro de cobre se modelan utilizando una aproximación lineal o Shock EOS (Autodyn, 2019) usualmente empleados en metales. El modelo empleado para los metales tiene en cuenta el comportamiento elástico a través de la ley de Hooke, emplea la función de Von Mises para definir los límites elásticos y el comportamiento elastoplástico. La regla

	Material del cuerpo	Carga explosiva	Espoleta	Anillo
Proyectil Tipo 1	Acero*1	Comp B	Aluminio	Cobre
Proyectil Tipo 2	Acero*2	TNT	Aluminio	Cobre
Proyectil Tipo 3	Acero*2	Comp B	Aluminio	Cobre
Proyectil Tipo 4	Acero*2	Hexolita	Aluminio	Cobre

Tabla 2: Materiales constitutivos de las diferentes partes del proyectil.

de endurecimiento se encuentra definida por la ecuación de Johnson Cook usada para modelar materiales, típicamente metales, sujetos a elevadas variaciones de presiones, variaciones de deformación y temperaturas. La simulación numérica de la fragmentación del proyectil HE M1

	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Límite elástico a la tracción[MPa]	Resistencia Máxima[MPa]	Elongación Máxima
Acero*1	7750	1500	1800	0.10
Acero*2	7830	800	1100	0.25

Tabla 3: Propiedades mecánicas del material del **cuerpo** del proyectil.

105 mm es conducida bajo el empleo de la *deformación geométrica instantánea* como criterio de erosión. Se realiza variando ciertas características del material del cuerpo del proyectil y de la carga explosiva según Tabla 2 y 3. Las especificaciones del material y los parámetros

requeridos como entrada (*inputs*) están definidos en la librería de AUTODYN®. En la Tabla 3 se presentan las principales propiedades mecánicas del material consideradas para el cuerpo del proyectil.

#### 4. RESULTADOS

En esta apartado se presentan y comparan los resultados obtenidos por la simulación numérica con los datos experimentales de Dhen y Zecevic, como también con los modelos analíticos de Held, Mott, Gurney-Sarmousakis, Gold-Baker y Grady-Kipp. En la Figura 4 se observa la se-

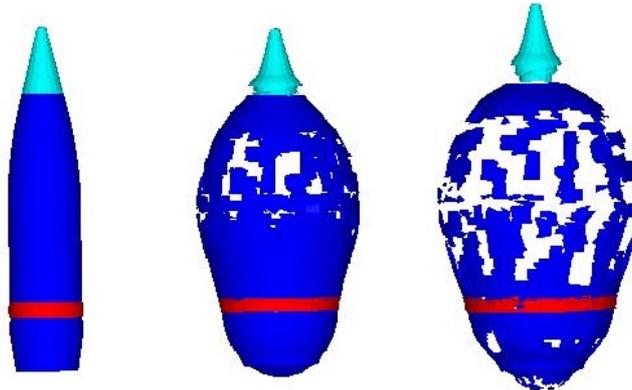


Figura 4: Secuencia de fragmentación;  $t = 0, 80$  y  $120 \mu s$ .

cuencia de expansión de los productos de detonación y la consecuente fragmentación del cuerpo del proyectil desde el  $t = 0$  hasta los  $120 \mu s$ . La onda de detonación se propaga a través de la sustancia energética elevando las presiones y temperaturas del medio explosivo y genera un impulso gaseoso que es transferido al proyectil. Con la implementación de técnicas numéricas se pueden obtener parámetros y variables físicos-químicas de la fenomenología explicada que, de otra manera, serían inalcanzables en una experimentación real. Es así, que, por ejemplo, pode-

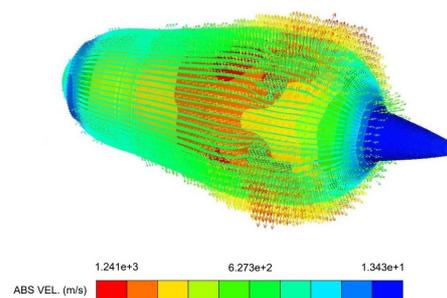


Figura 5: Velocidad de fragmentos producidos por detonación,  $t = 66 \mu s$ .

mos obtener distribuciones de temperatura en el cuerpo del proyectil producida la detonación, los esfuerzos a los que se somete la estructura del cuerpo del proyectil producto de la acción de la onda de choque (Quinodoz et al., 2019) o los vectores velocidad de los fragmentos del proyectil luego de iniciada la detonación según se aprecia en la Figura 5. En la mencionada, se observa que los fragmentos se aceleran hasta una velocidad de  $1241 \text{ m/s}$  conforme a la configuración de proyectil “Tipo 3”. Las variables mencionadas, pueden ser registradas en puntos de medición *virtuales* ubicados a solicitud del usuario. En la Figura 6 se observa, como salida (*output*) posible del post-proceso, la evolución transitoria de la velocidad de los fragmentos

atendiendo a la posición de los sensores seteados a tal efecto. La variación de la temperatura en

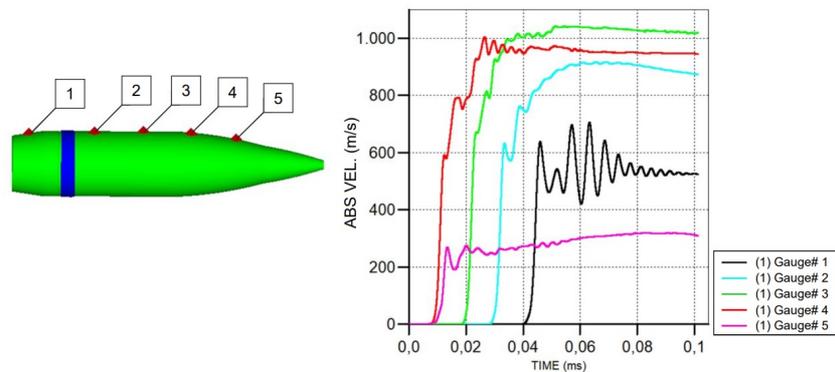


Figura 6: Variación de la Velocidad en el tiempo para un proyectil tipo 2 y posición de medidores dispuestos sobre el cuerpo metálico.

el tiempo, también puede ser captada por los medidores seteados dentro y fuera del proyectil según Figura 7. La discontinuidad presentada en el gráfico responde al final de formación de fragmentos en la posición seleccionada del sensor virtual ubicado sobre la geometría del proyectil. Esto se debe a la deformación intensiva del material y falla del elemento. Se aprecian temperaturas máximas de 783 K.

Los resultados obtenidos, producto de la simulación numérica, que describen el proceso de fragmentación se presentan en la Tabla 4. La masa mínima y máxima, son datos obtenidos a través del *solver*. La masa media es el promedio del total de las masas de los fragmentos del proyectil.

Proyectil	Masa de fragmentos $1g \leq m \leq 50g$			Total	
	Masa med M g	Masa min $M_{min}$ g	Masa max $M_{max}$ g	Número N -	Energía Cinética med $E_{k,med}$ kJ
Tipo 1	5.28	1.18	42.37	55	2.78
Tipo 2	4.04	1.37	49.77	72	1.36
Tipo 3	3.81	1.19	40.22	83	1.49
Tipo 4	3.64	1.19	49.83	117	2.81

Tabla 4: Valores obtenidos para distintos casos de fragmentación según configuración de cuerpo metálico y explosivo empleado.

Se puede analizar a través de los resultados de fragmentación de los casos presentados, el efecto del límite elástico del material del cuerpo metálico. Los tipos de proyectil estandarizados según tabla, con el límite elástico más bajo del material de la carcasa presentan el mayor número de fragmentos y la energía cinética promedio más baja por fragmento, mientras que el material de la carcasa con el límite elástico más alto entrega el número más bajo de fragmentos y la energía cinética promedio más alta por fragmento. Debe tenerse en cuenta que esta energía cinética promedio es la energía de los fragmentos después del agrietamiento final y de aceleración durante el vuelo libre (M.Ugrić y M.Ivaniević, 2015). Con la observación de los proyectiles tipo 2, 3 y 4, los cuales presentan mismas propiedades mecánicas del acero pero distinto explosivo; entrega mayor cantidad de fragmentos el modelo que utiliza el explosivo con más alta

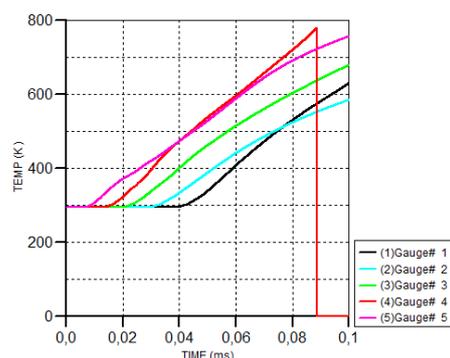


Figura 7: Variación de la temperatura dentro y fuera del cuerpo del proyectil.

velocidad de detonación (VOD) y mayor potencia aparente. En este caso el proyectil que emplea el explosivo denominado Hexolita. Las propiedades mecánicas del material del cuerpo del proyectil tienen poca incidencia en velocidad inicial de los fragmentos, atribuyéndose, esta, a un conjunto de variables entre las que se pueden mencionar espesor de pared del cuerpo del proyectil, tipo de explosivo y detonador, entre otras. En las Figuras 8 y 9 se presentan curvas

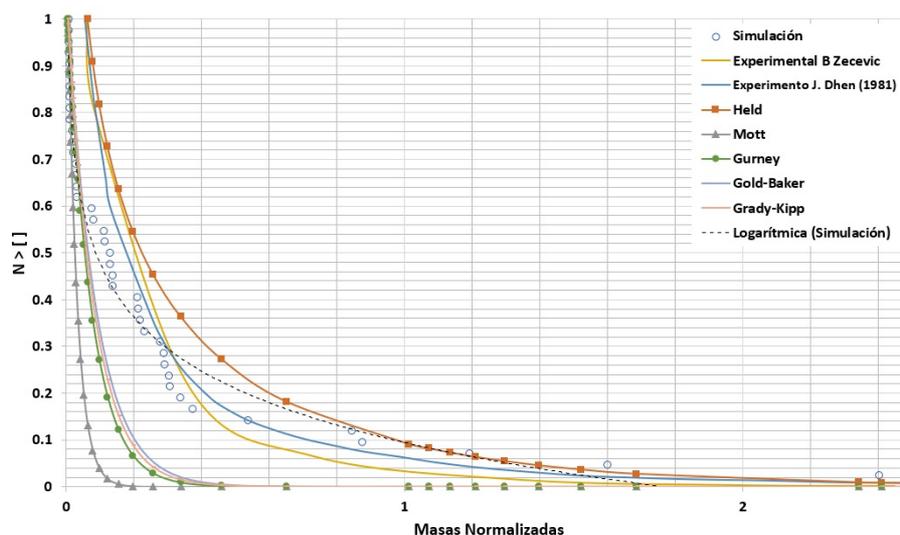


Figura 8: Curvas comparativas entre modelos empíricos, analíticos y de simulación numérica de la distribución de masas de fragmentos.

comparativas entre los modelos analíticos, empíricos y computacionales. En la Figura 8, se observa una distribución normalizada de masa de los fragmentos (masa de fragmentos sobre masa media de los fragmentos  $[m/M]$ ) respecto del número de fragmentos normalizados (número de fragmento sobre número total de fragmentos  $[n/N]$ ). Los datos de la simulación expuestos son los correspondientes al proyectil tipo 4. En la Figura 9 se expone un esquemático de cantidad porcentual de fragmentos respecto a la masa de los mismos. Esta comparación está dada entre datos analíticos del método de Held y los obtenidos por simulación.

## 5. CONCLUSIONES

La presentación del proceso de fragmentación de proyectiles, por simulación numérica, ofrece amplias posibilidades de estudio y análisis con una disminución de dificultades y costos evi-

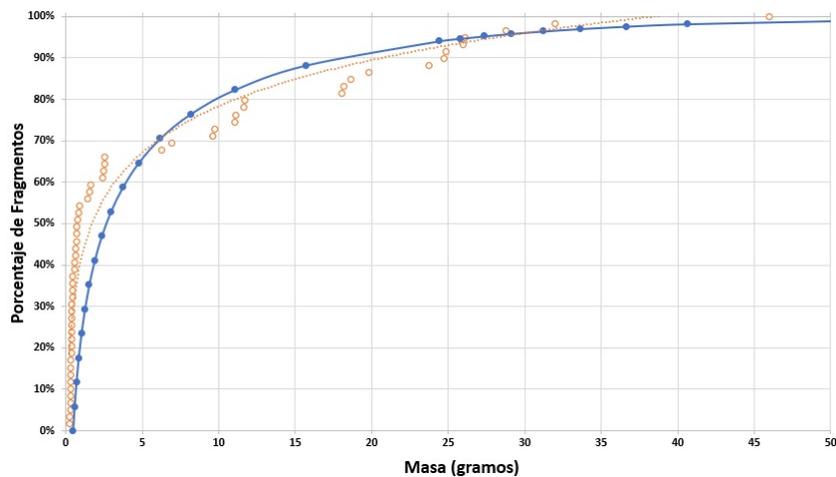


Figura 9: Curvas comparativas entre método del Held y resultados de simulación numérica sobre cantidad porcentual de fragmentos respecto de su masa.

dentes en ensayos experimentales de alta complejidad. La verificación de los modelos físico-químicos y la validación de los resultados, permitirán una implementación efectiva de los resultados obtenidos. La comparación con modelos experimentales y analíticos confirma que los parámetros de fragmentación obtenidos por simulación pueden predecir apropiadamente las características de ruptura del cuerpo del proyectil. Por otro lado, permiten modelar el fenómeno físico completo y abordar un amplio rango de problemas (variación de propiedades mecánicas de material y explosivo, por ejemplo) con mayores alternativas que los métodos analíticos clásicos. La captación de variables de interés producto de un evento no menor, como una detonación, realzan la importancia de la incorporación de las herramientas numéricas presentadas. Se demuestran, de esta manera, las potencialidades del solver presentado basado en elementos finitos para resolver problemas dinámicos no-lineales de fragmentación de proyectiles. Los datos obtenidos pueden usarse para suplementar datos experimentales y viceversa; y ambos pueden conducir a un mayor entendimiento del proceso fenomenológico presentado.

## REFERENCIAS

- Autodyn A. *Theory guide*. ANSYS, Inc., release 19.0 edition edición, 2019.
- Carleone J. *Tactical Missile Warheads*, volumen 155- Progress in Aeronautics and Astronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1993.
- C.E. Anderson. An overview of the theory of hydrocodes. *Int.J.Impact Engng*, Vol 5, 1987.
- Dehn J.T. Probability formulas for describing fragment size distributions. 1981.
- Elek P. y Jaramaz S. Fragment mass distribution of naturally fragmenting warheads. *FME Transactions-Vol 37-No 3*, página 129– 135, 2009.
- M.Ugrié y M.Ivanievié. Characterization of the natural fragmentaton of explosive ordnance using the numerical techniques based on the fem. *Scientific Technical Review-Vol 65-No 4*, página 14– 27, 2015.
- Quinodoz F., Moreira S., y Serafin E. El metodo de volúmenes finitos aplicado al problema de una onda de choque en un tubo como complemento de enseñanza y aprendizaje en educación superior. *Mecánica Computacional, Vol XXXVIII*, páginas 841–850, 2019.
- Zecevic B., Terzic J., y Catovic A. Influence of warhead design on natural fragmentation performances. *Annals of DAAAM for 2004 Proceedings of the 15th International DAAAM Symposium*, 2004.