

Propuesta de fórmula y método para la expresión de la potencia explosiva

Roberto Fernández-Franco
Julio Pedraza-Gárciga

Resumen

Se analizaron los métodos y fórmulas para el cálculo de la potencia de los explosivos convencionales o químicos que aparecen tanto en la normativa vigente como en la bibliografía especializada; sobre la base de las limitantes de estos procedimientos, que no proporcionan un criterio valorativo uniforme y conforman un basamento marcadamente empírico para el tratamiento del tema, se derivaron nuevas fórmulas para el cálculo de este importante parámetro, tomando como elemento central la expresión del cálculo de la potencia que desarrollan las cargas cilíndricas alargadas por ser las más usadas en voladuras, y se propuso un método para expresarla. Como aplicación teórica derivada se deducen las fórmulas para el cálculo de la fuerza explosiva y la presión de detonación que desarrollan este tipo de cargas.

Palabras clave

Explosivos detonantes; potencia; fuerza explosiva; presión de detonación; voladuras.

Proposal of formula and method to calculate explosive power

Abstract

To calculate the power of conventional or chemical explosives, several methods and formulae available in both the regulations in place and specialized bibliography were analyzed. Given the limitations of the available procedures that do not provide uniform evaluation criteria and that are markedly based on empiricism to deal with the topic appropriately, new formulae were deduced for the calculation of this key parameter taking as a key element the expression for calculating the power generated by elongated cylindrical charges; which are the most widely used in explosions and the methods to express them are then proposed. The formulae are deduced as a theoretical application to calculate the explosive strength and the detonation pressure of this type of charges.

Keywords

Detonating explosive; power; explosive strength; detonation pressure; detonation.

1. INTRODUCCIÓN

Al pensar en los efectos térmicos que acompañan a las reacciones químicas es conveniente imaginar que cada compuesto posee un contenido calorífico (o "entalpía") definido. El calor de formación en condiciones normales es una medida de este contenido calorífico, expresándose su valor con respecto a un cero arbitrario correspondiente a los elementos constituyentes, la cuestión de si durante una reacción se desprenderá calor o será absorbido queda determinada por el conjunto o suma de los contenidos caloríficos de los productos de la reacción, en comparación con la suma correspondiente a los reactivos.

A estos principios también están sujetas las reacciones explosivas denominadas "convencionales o químicas", cuyo aspecto distintivo no está en el origen de la energía que desprenden sino, en la enorme velocidad con que la transfieren al medio circundante.

Aunque la energía que liberan las explosiones químicas por unidad de masa es incomparablemente menor a la que alcanzan las explosiones nucleares, estas no pueden sustituir a las primeras, al menos en el estado actual de la técnica; antes deberán superarse serios problemas referentes al control de los productos radiactivos que emiten y el hecho de que para la mayoría de las posibles aplicaciones resultan demasiado potentes. En consecuencia, los explosivos convencionales continúan ocupando un lugar relevante entre los medios de que dispone el hombre para transformar su entorno, en correspondencia con sus necesidades y extraer los recursos minerales que exige el sostenimiento de numerosas e importantes ramas industriales.

Los explosivos (en lo adelante solo nos referiremos a los explosivos convencionales o químicos) poseen propiedades diferenciadoras que los caracterizan para ser empleados en el trabajo de voladura que se necesite realizar; sus características más importantes son: potencia, velocidad de detonación, densidad, presión de detonación, fuerza, sensibilidad y resistencia al agua (Pernia-Llera *et al.* 1989; Watanabe-Cabrera 2012).

Es la potencia de las reacciones explosivas la propiedad que expresa su esencia. De forma general, es aceptable considerar la potencia como la energía disponible para producir efectos mecánicos (Pernia-Llera *et al.* 1989). Este parámetro se determina por diversos métodos prácticos y fórmulas empíricas, siendo algunos muy efectivos para unos tipos de explosivos, sin embargo, para otros, los resultados

difieren a los obtenidos en distintos trabajos de voladuras. Entre los métodos prácticos más empleados y conocidos pueden citarse los siguientes:

Método Traulz (Bomba de plomo): determina la capacidad de expansión que produce la detonación de 10 g de explosivo en el interior de un bloque cilíndrico de plomo de dimensiones normalizadas (Otaño–Noguel 1980; Pernia-Llera *et al.* 1989).

Mortero balístico: consiste en comparar la propulsión de un mortero de acero montado sobre un péndulo balístico por el efecto de los gases, cuando se hace detonar una carga de 10 g de explosivo dentro del mismo (Otaño–Noguel 1980; Pernia-Llera *et al.* 1989).

Método de la potencia sísmica: consiste en hacer detonar una carga de explosivo en un medio rocoso isótropo y registrar la perturbación sísmica producida a una distancia determinada; como explosivo patrón suele tomarse el ANFO y se supone que la variación de las vibraciones es proporcional a la energía del explosivo elevada a dos tercios (Pernia-Llera *et al.* 1989).

Método del cráter: se basa en la determinación de la profundidad crítica y la profundidad óptima, que son aquellas para las que una carga de explosivo rompe la roca en superficie y produce el cráter de mayor volumen, respectivamente (Pernia-Llera *et al.* 1989).

Método del aplastamiento de un cilindro (Brisancia): define el poder rompedor de un explosivo, que está relacionado con la capacidad de fragmentación de la roca, por medio del aplastamiento que produce una carga explosiva de 100 g sobre un cilindro de plomo con dimensiones normalizadas; existen varios métodos pero el más empleado es el método de Hess (Otaño –Noguel 1980; Pernia-Llera *et al.* 1989).

Medida de la energía bajo el agua: consiste en hacer detonar bajo el agua una carga explosiva y registrar mediante la colocación de un captador de presión las ondas hidráulicas que se generan. Se plantea que de esta forma se logra cuantificar por separado la energía vinculada a la onda de choque y la energía de los gases (Pernia-Llera *et al.* 1989).

Cada uno de los métodos prácticos mencionados proporcionan una información técnica diferente y son expresión de cómo se manifiesta

la energía de los explosivos en las condiciones concretas de cada ensayo (para ver las condiciones concretas de cada ensayo buscar en relación de normas que aparecen en la bibliografía).

1.1. Fórmulas empíricas para el cálculo de la potencia

En la bibliografía consultada aparecen varias fórmulas empíricas. La fórmula sueca (Pernia-Llera *et al.* 1989) propuesta para determinar la potencia relativa en peso (PRP) de un explosivo es:

$$PRP = \frac{5}{6} x \frac{Q_e}{Q_o} + \frac{1}{6} x \frac{VG}{VGo} \quad (1)$$

Donde:

Q_o = Calor de explosión de 1 kg de explosivo LFB (5 MJ/kg) en condiciones normales de presión y temperatura

Q_e = Calor de explosión en MJ/kg del explosivo a emplear

VGo = Volumen de los gases liberados por 1kg del explosivo LFB (0,85 m³/kg)

VG = volumen de los gases m³/kg del explosivo a emplear.

Otra ecuación citada es la de Paddock (Pernia-Llera *et al.* 1989) que sugiere comparar los explosivos mediante el denominado Factor de Potencia (FP):

$$FP = PAPxVDxPe \quad (2)$$

Donde:

PAP = Potencia absoluta en peso del explosivo, cal/g

VD = Velocidad de detonación, m/s

Pe = Densidad del explosivo, g/cm³

Otra expresión (Pernia-Llera *et al.* 1989) para calcular la potencia relativa en peso es:

$$PRP = \left(\frac{PexVD^2}{PoxVDo^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Donde:

P_e = Densidad del explosivo, g/cm³

VD = Velocidad de detonación, m/s

P_o y VD_o se refieren al explosivo patrón.

Un método muy empleado actualmente es expresar la potencia relativa por peso y la potencia relativa por volumen.

La potencia relativa por peso, conocida por sus iniciales en inglés, *RWS* (Pernia-Llera *et al.* 1989) es el resultado de dividir la potencia absoluta por peso, *PAP*, (energía por unidad de masa) en cal/g del explosivo en cuestión, entre la *PAP* del explosivo patrón.

Potencia relativa por volumen, conocida por sus iniciales en inglés *RBS* (Pernia-Llera *et al.* 1989), es el resultado de dividir la potencia absoluta por volumen, *PAV*, (energía por unidad de volumen) del explosivo en cuestión, entre la *PAV* del explosivo patrón, para lo que debemos tener en cuenta que la *PAV* de un explosivo es igual a su *PAP* en cal/g, por su densidad P_e , en g/cm³.

$$RBS = \frac{PAP_x P_e}{PAP_p P_{e_p}} \quad (4)$$

Donde:

PAP = Potencia absoluta en peso del explosivo en cuestión, cal/g

P_e = Densidad del explosivo en cuestión, g/cm³

PAP_p y P_{e_p} = se refieren al explosivo patrón.

Estas fórmulas empíricas no tienen en cuenta la influencia de las formas y dimensiones geométricas de las cargas y sugieren un valor absoluto de potencia para establecer una comparación entre los explosivos, en realidad la potencia que desarrollan estas reacciones es una magnitud muy relativa.

De lo anterior se deduce que son varios los métodos y normas empleados para determinar la potencia explosiva, a los que se añaden otros existentes en la literatura consultada (Otaño-Noguel 1980; Pernia-Llera *et al.* 1989). Es por ello que se hace necesario desarrollar

un método lógico que permita estandarizar el cálculo de este parámetro de los explosivos, lo cual constituye el objetivo general del presente trabajo.

2. DEDUCCIÓN DE FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE POTENCIA

Aunque en la técnica se empleen para hacer referencia a la potencia explosiva N_{ex} términos como: "potencia rompedora", "brisancia", "potencia sísmica", etc., con sus respectivas particularidades, en términos físicos esta magnitud se define como la cantidad de trabajo W_{ex} que realiza la reacción química explosiva en la unidad de tiempo T .

$$N_{ex} = \frac{W_{ex}}{T} \quad (5)$$

Como el trabajo que realiza una explosión W_{ex} es a costa precisamente de la energía química puede considerarse su valor como el producto de la masa reaccionante Mr por el calor de explosión Q_e .

$$W_{ex} = MrxQ_e \quad (6)$$

Y el tiempo T de la reacción es igual al recorrido Ro que realiza la onda de choque para la transformación total de la masa explosiva, entre la velocidad de detonación V_d .

$$T = \frac{Ro}{V_d} \quad (7)$$

Sustituyendo en (5) los valores hallados en (6) y (7) se obtiene:

$$N_{ex} = \frac{MrxQ_eV_d}{Ro} \quad (8)$$

Donde:

N_{ex} = Potencia explosiva, W.

Mr = Masa reaccionante, kg.

Q_e = Calor de explosión, J/kg.

V_d = Velocidad de detonación, m/s.

Ro = Recorrido de la onda de choque, m.

Análisis de las unidades:

$$(\text{Kg} \times \text{J/kg} \times \text{m/s}) / \text{m} = \text{J/s} = \text{W}$$

Aunque la expresión (8) puede aplicarse a cargas de variadas configuraciones geométricas, pueden deducirse a partir de ella otras expresiones equivalentes más sencillas que facilitan los cálculos para determinadas estructuras, tal es el caso de las cargas cilíndricas alargadas, en las que se centra el interés fundamental de este trabajo. Para estas cargas el recorrido R_o de la onda de choque es igual a su volumen V_c entre el área A de la sección transversal.

$$R_o = \frac{V_c}{A} \quad (9)$$

Agregando que el volumen V_c de la carga está determinado por su masa M_r entre la densidad ρ , al sustituir este valor de V_c en (9) para luego sustituir en (7) el valor de R_o hallado, obtenemos reduciendo a la mínima expresión:

$$N_{ex} = Q_{ex} \rho A x V_d \quad (10)$$

Donde:

N_{ex} = Potencia explosiva para cargas cilíndricas alargadas, W

Q_e = Calor de explosión, J/ kg

ρ = Densidad del explosivo, kg/ m³

A = Área de la sección transversal de la carga, m²

V_d = Velocidad de detonación, m/s

Análisis de las unidades:

$$\text{J/kg} \times \text{kg/m}^3 \times \text{m}^2 \times \text{m/s} = \text{J/s} = \text{W}$$

De esta forma pueden hallarse para otras estructuras fórmulas que como esta (10) facilitan los cálculos, aunque siempre habrá casos donde resulte más cómodo aplicar la fórmula (8).

3. MÉTODO PARA EXPRESAR LA POTENCIA EXPLOSIVA

Con el empleo de la fórmula propuesta, reflejar en un sistema de coordenadas el comportamiento de la potencia, en la medida que se incrementa el diámetro de la carga, trazando de esta forma la curva característica de cada explosivo, constituye un valioso recurso comparativo sobre la base del valor que adquiere este parámetro en relación con el diámetro. Esto permite, además, precisar, con el análisis de la correspondencia entre la efectividad demostrada en la práctica de las voladuras de los explosivos conocidos y sus respectivas curvas, los rangos de potencia idóneos para cada tipo de roca a volar o trabajo de voladura a realizar, resultando que en lo adelante será suficiente para valorar la potencia de los productos explosivos el trazado de sus respectivas curvas.

En la Figura 1 se muestra un primer acercamiento al procedimiento propuesto, mostrándose tres explosivos de referencia cuyas características fueron estimadas de acuerdo a la experiencia de varios años en la actividad de voladuras; disponiendo de una base de datos más amplia pueden establecerse patrones y límites más precisos.

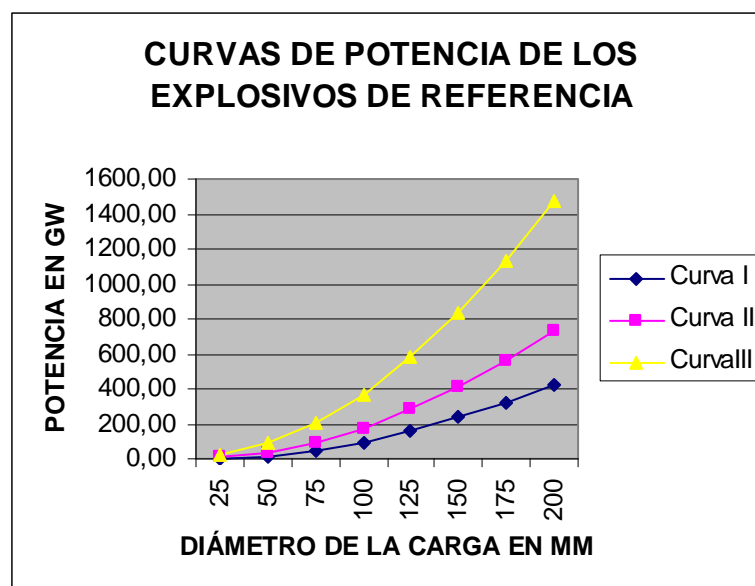


Figura 1. Curvas de los explosivos de referencia.

La curva I muestra el comportamiento de un explosivo tipo ANFO, útil para la fragmentación de rocas blandas (entre 400 y 600 kg/cm² de resistencia a compresión); por debajo de esta curva se encuentran los explosivos de menor potencia que el ANFO, algunos explosivos de seguridad, mezclas diluidas y de baja densidad.

La curva II se corresponde con el trazado de un explosivo emulsionado con características idóneas para la fragmentación de rocas de dureza media (entre 600 y 1 000 kg/cm² de resistencia a compresión).

La curva III refleja el comportamiento de una dinamita con alto porcentaje de NG, apta para la fragmentación de rocas duras (entre 1 000 y 2 000 kg/cm² de resistencia a compresión) Por encima de esta curva se encuentran las dinamitas para aplicaciones especiales y los altos explosivos. La potencia de los explosivos desconocidos se valorará por la posición de su trazado con respecto a estas curvas de referencia.

El orden que se aprecia en el trazado de estas curvas (Figura 1) no contradice al conocimiento general que se tiene acerca de los explosivos mediante el uso de los métodos prácticos y las fórmulas empíricas, solo que para llegar a este conocimiento el método propuesto se vale de un basamento teóricamente argumentado, que proporciona la posibilidad de estandarizar el proceso de caracterización de la potencia de los explosivos, mientras los métodos prácticos proporcionan un tratamiento marcadamente empírico del tema, que ofrece una información muy heterogénea sobre este parámetro.

Como la obtención de la fórmula para el cálculo de la potencia de las cargas cilíndricas alargadas (ecuación 10) facilita la deducción de las expresiones matemáticas para el cálculo de la fuerza explosiva (F_{ex}) y la presión de detonación (PD) de esas cargas, resulta viable efectuar el siguiente análisis.

3.1. Deducción de fórmulas para el cálculo de la fuerza explosiva (F_{ex}) y la presión de detonación (PD) de las cargas cilíndricas alargadas

Conociendo la relación existente entre la potencia y la fuerza se define la fuerza explosiva F_{ex} como la potencia explosiva N_{ex} entre la velocidad de detonación V_d .

$$F_{ex} = \frac{N_{ex}}{V_d} \quad (11)$$

Si sustituimos en (11) el valor de potencia explosiva hallado para cargas cilíndricas alargadas en (10) obtenemos:

$$F_{ex} = Q_{exp} \rho x A \quad (12)$$

Donde:

F_{ex} = Fuerza explosiva para cargas cilíndricas alargadas, N

Q_e = Calor de explosión, J/kg

ρ = Densidad del explosivo kg/m³

A = Área de la sección transversal de la carga, m²

Análisis de las unidades:

$J/kg \times kg/m^3 \times m^2 = (N \times m)/m = N$

Y considerando que la presión en términos físicos se define como la fuerza entre el área, si tomamos el valor hallado en (12) y aplicamos esta definición obtendríamos que:

$$PD = Q_{exp} \quad (13)$$

Donde:

PD = Presión de detonación, Pa

Q_e = Calor de explosión, J/kg

ρ = Densidad del explosivo kg/m³

Análisis de las unidades

$J/Kg \times kg/m^3 = N/m^2 = Pa$

En general, la PD de los explosivos comerciales alcanza valores entre 2 y 10 GPa. Los valores de PD proporcionan un criterio muy importante cuando se precisan volar materiales duros y compactos y complementan la información que brinda la curva de potencia. La presión de detonación es una propiedad que refleja bien el poder rompedor o brisancia de los explosivos, por lo que resulta conveniente diferenciar la presión de detonación absoluta (PDA) de la presión de detonación relativa (PDR). La PDA (que se expresa en GPa), es el producto del calor de explosión por la densidad del explosivo, mientras la PDR es igual al valor de PDA por 10, e indica la cuantía en por ciento del valor de PDA del explosivo en cuestión respecto al valor máximo (10 GPa) de PDA que puede alcanzar un explosivo comercial (es posible que existan explosivos químicos de uso más restringido, que alcancen valores de PDA superiores a 10 GPa, pero

este particular no es de interés para este trabajo). En la Figura 2 aparecen los valores de PDA y PDR de algunos explosivos.

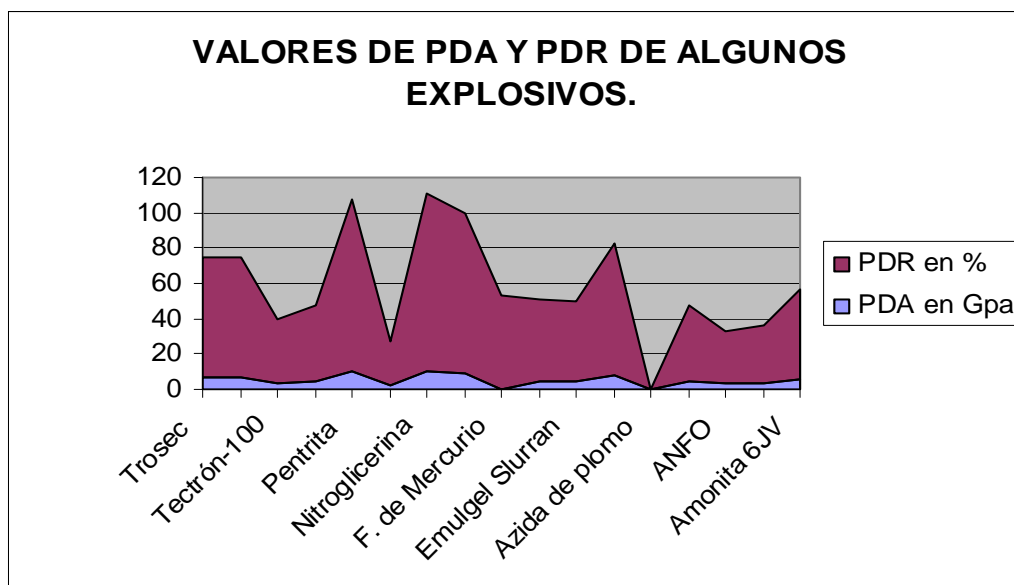


Figura 2. Valores de PDA y PDR de algunos explosivos.

4. RESULTADOS

Con el análisis de la situación actual de los métodos y fórmulas empleado en la determinación de la potencia explosiva se pudo constatar que no se utiliza un procedimiento uniforme o estándar.

Mediante el proceso deductivo desarrollado en este trabajo se logra definir una ecuación (10) para el cálculo de la potencia explosiva que desarrollan las cargas cilíndricas alargadas, lo cual fundamenta la propuesta de un método para expresar dicho parámetro. Así como una ecuación (8) que posibilita deducir expresiones sencillas de la potencia en cargas de otras configuraciones geométricas.

Se deducen ecuaciones para el cálculo de la fuerza explosiva y la presión de detonación (ecuaciones 12 y 13) de las cargas cilíndricas alargadas, definiéndose los conceptos de presión de detonación absoluta (PDA) y presión de detonación relativa (PDR); además, se muestra un dibujo (2) donde aparecen los valores de estos dos parámetros para un grupo de explosivos, por lo que se supera el objetivo inicial propuesto y se obtiene una importante información técnica adicional no prevista.

5. DISCUSIÓN

La introducción del método propuesto para la expresión de la potencia que desarrollan las cargas cilíndricas alargadas, a diferencia de los procedimientos que actualmente se emplean, puede establecer un procedimiento estándar para la evaluación de este parámetro, ya que se basa en elementos científicamente argumentados que en lo esencial no contradicen la práctica.

La aplicación de las ecuaciones (8 y 10) deducidas para el cálculo de la potencia muestran que las formas y dimensiones geométricas de las cargas tienen una influencia decisiva sobre la potencia que desarrollan los explosivos, y en este sentido la ecuación (8) deja abierta las posibilidades teóricas para el cálculo de la potencia en diversas estructuras geométricas de las cargas, por lo que esta puede hallar múltiples aplicaciones.

Con la deducción de ecuaciones para el cálculo de la fuerza explosiva y la presión de detonación de las cargas cilíndricas (ecuaciones 12 y 13) se supera el objetivo inicial y se introducen dos importantes elementos de cálculo que proporcionan una importante información complementaria para establecer criterios de selección de los explosivos más acertados y enriquecen el estado del arte sobre este particular.

Los elementos técnicos que aportan las definiciones de presión de detonación absoluta (PDA) y la presión de detonación relativa (PDR) pueden hallarse en la interpretación de estos valores para el TNT que posee una PDA de 6,75 GPa. Conocer este valor es de gran utilidad cuando se requiere efectuar un cálculo físico específico, por otra parte su valor de PDR (67,5 %) reafirma el criterio que siempre se ha manejado respecto a su poder rompedor; el TNT, atendiendo a este parámetro, no es un alto explosivo, su comportamiento es similar al de las dinamitas.

De las ecuaciones para el cálculo de los parámetros físicos en cargas cilíndricas alargadas aquí deducidas (potencia, fuerza y presión de detonación) es la potencia (10) la que brinda una información más completa, ya que engloba a los dos restantes e involucra tres de las características más importantes que definen la aptitud de un explosivo: el calor de explosión, la densidad y la velocidad de detonación.

6. CONCLUSIONES

La diversidad de métodos prácticos y fórmulas empíricas relacionados en este trabajo evidencian que no se emplea un procedimiento estándar para la expresión de la potencia explosiva, y que además estos métodos y fórmulas proporcionan un tratamiento marcadamente empírico del tema, muy cuestionable en ocasiones desde el punto de vista técnico.

El análisis dimensional de las fórmulas deducidas en este trabajo satisfacen la probatoria condición necesaria de corresponder a las magnitudes que expresan, y los valores obtenidos con su aplicación se corresponden esencialmente con la experiencia práctica.

Con la aplicación de la ecuación (10) y el método para la expresión de la potencia que desarrollan las cargas cilíndricas alargadas aquí propuestos, se introducen elementos científicamente argumentados con los que se puede superar la problemática planteada, reduciéndose además los gastos y la seguridad personal por concepto de pruebas o ensayos de laboratorio.

7. REFERENCIAS

- OTAÑO-NOGUEL, JOSÉ A. 1980: Métodos de valoración de la efectividad y la calidad de las sustancias explosivas. En: Castellat, J. M. (editor) *Fragmentación de rocas con explosivos*. Pueblo y Educación, La Habana, cap. II, p. 35-39.
- PERNIA-LLERA, JOSÉ M.; LÓPEZ-JIMENO, CARLOS; PLA-ORTIZ, FERNANDO; LÓPEZ-JIMENO, EMILIO. 1989: Propiedades de los explosivos. En: *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Instituto Geológico y Minero de España, cap. 10, p. 107-110.
- WATANABE-CABRERA, JORGE A. 2012: Explosivos tipos y propiedades. Consulta: 21 sept 2011. Disponible en: Monografias.com.
- GOST 5984 - 95: Sustancias explosivas. Método para determinar la potencia rompedora.
- UNE 31-023-2004: Determinación del poder rompedor de los explosivos (por el método de HESS).
- UNE 31-302-2002: Ensayo de explosivos en péndulo balístico.
- UNE 31-001-1998: Ensayo de explosivos en bloque de plomo prueba de Trauzl.
- NFT 70-128-2000: Explosivos para uso civil. Explosivos. Determinación de las características de funcionamiento. Coeficiente de uso práctico.
- UNE 31006-99: Nomenclatura y clasificación general de los explosivos.
- UNE 31002-2001: Cálculo de las principales características teóricas de los explosivos.
- NFT 70-128-2003: Explosivos para uso civil. Explosivos. Determinación de las características de funcionamiento. Coeficiente de uso práctico.

Roberto Fernández-Franco alexvl@uclv.edu.cu
Especialista en Explotación de Yacimientos a Cielo Abierto, Pensionado,
Residente en: Carretera al Purio, Finca la Caridad, Calabazar de Sagua,
Villa Clara, Cuba.

Julio Pedraza-Garciga juliop@uclv.edu.cu
Profesor Titular. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central
"Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.