

Tendencias actuales en la cimentación de presas en rocas:

El simposio de Río de Janeiro (*)

Por MANUEL ROMANA RUIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Uno de los aspectos más importantes de la construcción de presas es el relativo a la excavación del terreno para su cimentación, tema sobre el cual se celebró en 1978 un Simposio Internacional en Río de Janeiro, que se comenta en el artículo incluyendo un resumen sobre la situación actual de conocimientos sobre el efecto de las voladuras.

Recuerdo que, recién nombrado Jefe de Obra de la Presa de la Barca, hace más de 15 años, tuve que preparar la primera certificación. Al presentarla al Delegado de la Administración expliqué:

—“Vamos algo retrasados en el hormigonado del puente de acceso pero el plan de obra se compensa porque hemos excavado más de lo previsto”.

La respuesta no se me olvidará:

—“Claro, siempre ha sido más fácil destruir que construir”.

En la frase subyace la filosofía reinante en la época: excavar es simplemente destruir. Una labor poco técnica y rutinaria a cargo de subalternos. Por eso causaba extrañeza que un joven y bisoño Jefe de Obra no permitiese dar una pega sin aprobar previamente el plan de tiro. Y sin embargo ya se estaba excavando la Central de Alcántara que nos ha acompañado tanto tiempo desde la portada de “Rock blasting” (Langefors y Kihlstrom, 1963) con sus planos verticales, perfilados, limpios y como cortados a cuchillo.

Esa evolución técnica, combinada con el potente desarrollo de las máquinas de perforación y con la utilización de la nagolita, ha inducido, a través de innumerables obras de creciente calidad a la situación actual donde la excavación y fragmentación de rocas (con voladuras o por métodos mecánicos) constituyen una parte importante de la mecánica de rocas: la teoría de la Conminución y donde la excavación se estudia, se programa y se controla.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 28 de febrero de 1981.

En el Simposio que comentamos sobre “Mecánica de rocas en relación con la cimentación de presas” la sesión IV se dedicó a la “Influencia de las voladuras de excavación sobre las estructuras y sobre la roca remanente”. Las cuatro comunicaciones presentadas (de la cuales una, excelente, era española) ofrecen a través de las realizaciones expuestas una perspectiva interesante y actual del estado de la cuestión basándose en una serie de teorías más o menos empíricas publicadas en los últimos doce años. Con objeto de dar una visión de conjunto completa y coherente voy a recordar, aunque de forma brevísima, la situación actual de conocimientos sobre el efecto de las voladuras.

La onda de choque ocasionada por una voladura puntual en un medio isótropo es esférica. La ecuación diferencial y su solución son:

$$(A) \quad \frac{\delta^2(ru)}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2(ru)}{\delta r^2}$$

$$ru = g(r + ct) + f(r - ct)$$

donde: u desplazamiento radial de un punto.

r distancia al foco.

t tiempo.

c celeridad longitudinal.

La deformación dinámica unitaria ϵ al paso de la onda es:

$$\epsilon = \frac{V}{c}$$

donde V es la velocidad de las partículas ($V = \dot{u}$).

Para un comportamiento elástico

$$(B) \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

donde: E módulo de elasticidad.
 ρ densidad del medio.

Y la tensión dinámica al paso de la onda σ :

$$(C) \quad \sigma = E \epsilon = E \frac{V}{c} = \rho c V$$

La tensión es proporcional a la velocidad de las partículas V y a la impedancia del medio ρc .

Al paso de la onda aparecerán compresiones y después de reflejarse en una cara libre (o una discontinuidad) surgirán tracciones. Como la resistencia de la roca a la tracción es menor que a compresión serán más probables las roturas en lajas paralelas a las caras libres, pensamiento del que parte toda la moderna teoría de la fragmentación.

Pero la velocidad (y el desplazamiento) se amortigua al crecer la distancia r (Ecuación A).

Todo el mundo está de acuerdo con esta amortiguación pero se expresa con ecuaciones, empí-

ricas, dimensionalmente diferentes que se aplican no en un medio indefinido isotropo sino en las cercanías de la superficie.

$$(D) \quad V = K \left(\frac{D}{Q^\alpha} \right)^\beta$$

donde: K constante empírica a determinar en cada caso

Q carga de explosivo por cada fase de tiro

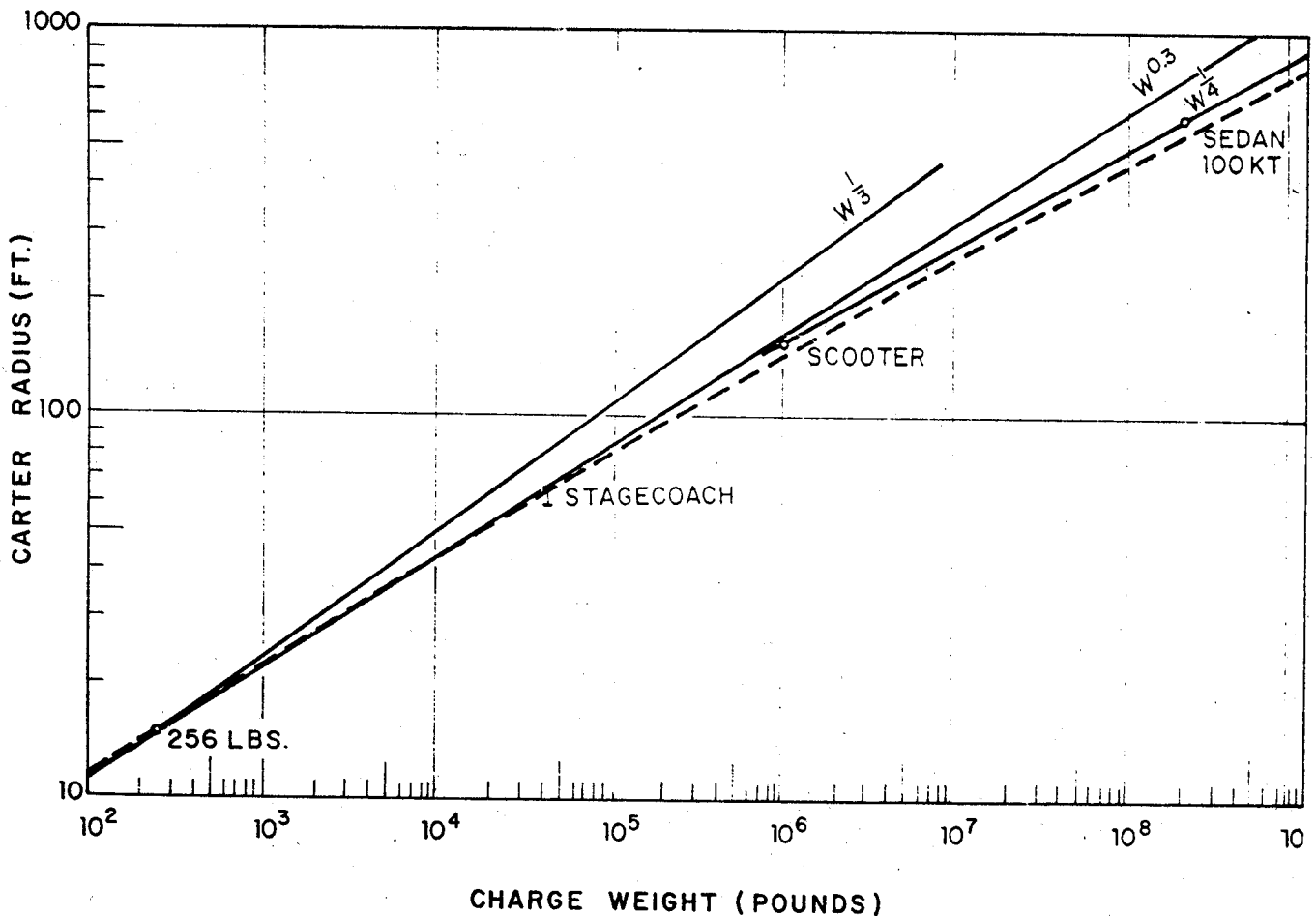
D distancia al foco

β factor de amortiguamiento

α es un factor muy controvertido, representa el tipo de escala adimensional y vale:

- a) $1/3$ para las teorías basadas en el análisis dimensional (Ambraseys y Hendron, 1968). "Escala cúbica".
- b) $1/2$ para las determinaciones empíricas americanas (USBM,; Oriard, 1970, 1971; Devine, etc.) "Escala cuadrática".
- c) $2/3$ para las determinaciones empíricas de Langefors y Kihlstrom (1963).

Fig. 1. Relación entre el radio de un cráter y la carga explosiva (Vortman, 1963),



La discusión sobre este exponente es a menudo acerba y se supone habitualmente que no hay datos para resolverla. En realidad ninguna de las expresiones es completa. La ley de similitud entre voladuras es del tipo

$$(E) \quad Q = a_2 D^2 + a_3 D^3 + a_4 D^4$$

(véase su discusión en Romana, 1975)

donde el primer término refleja la influencia de la energía de fracturación, el segundo el de la energía de deformación elástica y el tercero el de la energía consumida en efectos inerciales (que solo pesan en grandes explosiones como se muestra en la Figura 1 donde se registran tres explosiones nucleares).

Desde un punto de vista práctico no hay realmente gran diferencia entre la formulación b) ($\alpha = 1/2$) y la c) ($\alpha = 1/3$) como demuestra la figura 2 (Chae Y.S. 1978) donde se comparan los rangos de datos de velocidad compilados por el U.S.B.M. ($\alpha = 1/2$) con los reunidos por Hendron ($\alpha = 1/3$). El exponente $1/2$ conduce a resultados más conservadores. Como además en pequeñas voladuras (como las de contorno de una presa) priman los aspectos de fracturación superficial sobre los masivos parece razonable adoptar la escala cuadrática, que tiene además la ventaja de una gran masa de experiencia.

Sin embargo el peso de Langefors es grande y se sigue utilizando su formulación. Por ejemplo Figueroa (1975) representando, de alguna manera, la opinión de Explosivos Rio Tinto contrapone las que el llama "conclusiones suecas" (fijando para β el valor $-0,75$) con las "conclusiones americanas" que prefiere porque "han sido hechas englobando sus propias experiencias y las de otros investigadores".

La polémica no está saldada y en las comunicaciones al Simposio de Rio se utilizan ambas para excavaciones tan importantes como Itaipu (de Paula, Saad y Dozzi) o Sayago (Elejabarrieta, Feijoo, González y Llamas).

El análisis estadístico demostró en Itaipu que los coeficientes de correlación eran muy buenos en cualquier caso:

- a) Escala cúbica 0,900 - 0,979
- b) Escala cuadrática 0,915 - 0,973
- c) Fórmula sueca 0,930 - 0,947

El informe oficial del Instituto de Pesquisas Tecnológicas para el consorcio UNICOM clasificó los tres métodos con diversos criterios estadísticos aceptando tanto el de Langefors, como el de la escala cuadrática. El número de observaciones fué muy reducido (22 voladuras de ensayos y 62 medi-

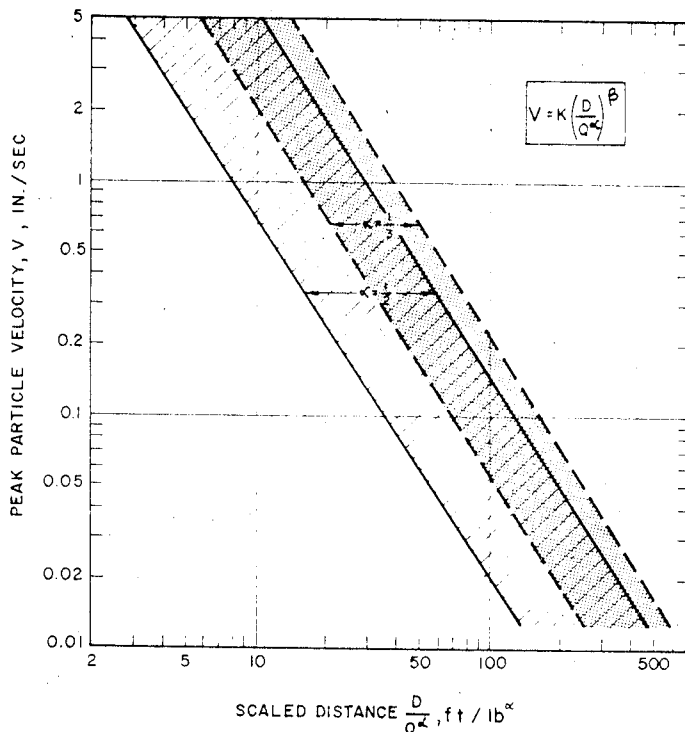


Fig. 2. Resumen de determinaciones de velocidades en ensayos de voladuras.

Area rayada con datos del USBM ($\alpha = 1/2$).

Area punteada con datos compilados por Hendron ($\alpha = 1/3$). (Resumen de Chae, 1978).

ciones en voladuras reales) por lo que no debe concederese a estas determinaciones excesivo valor.

En la Figura 3 se comparan las tres fórmulas mencionadas con los parámetros utilizados en un caso real de excavación subterránea en granito sano.

En la Figura 4 aparecen los valores reales medidos en ese caso que se ajustan bastante bien con la fórmula de Devine pero presentan una dispersión peligrosa que puede deberse a un grado elevado de confinamiento.

$$(F) \quad V = 675 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1,6} \quad (\text{Devine})$$

Un límite máximo parece ser la fórmula de Oriard también recogida en la figura:

$$(G) \quad V = 3.600 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1,6}$$

En ambas fórmulas V se expresa en mm/seg. y $D/Q^{1/2}$ en m/Kg^{1/2}.

Los criterios sobre las velocidades instantáneas que producen daños fueron establecidas por Duvall

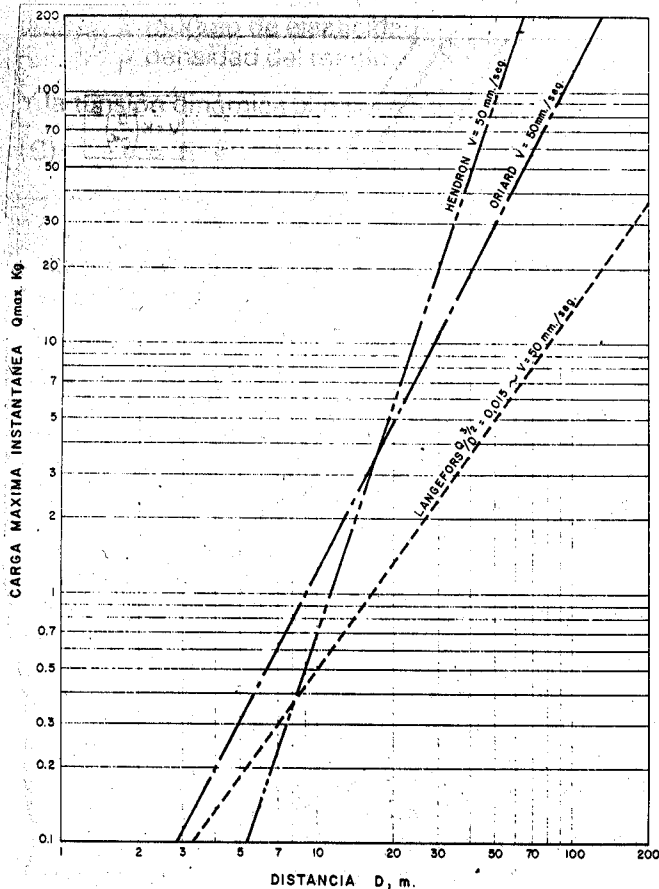


Fig. 3. Comparación entre las relaciones carga-distancia según las fórmulas de Lancefors ($\alpha = 2/3$), Oriard ($\alpha = 1/2$) y Hendron ($\alpha = 1/3$ para un caso concreto ($V = 50$ mm/seg).

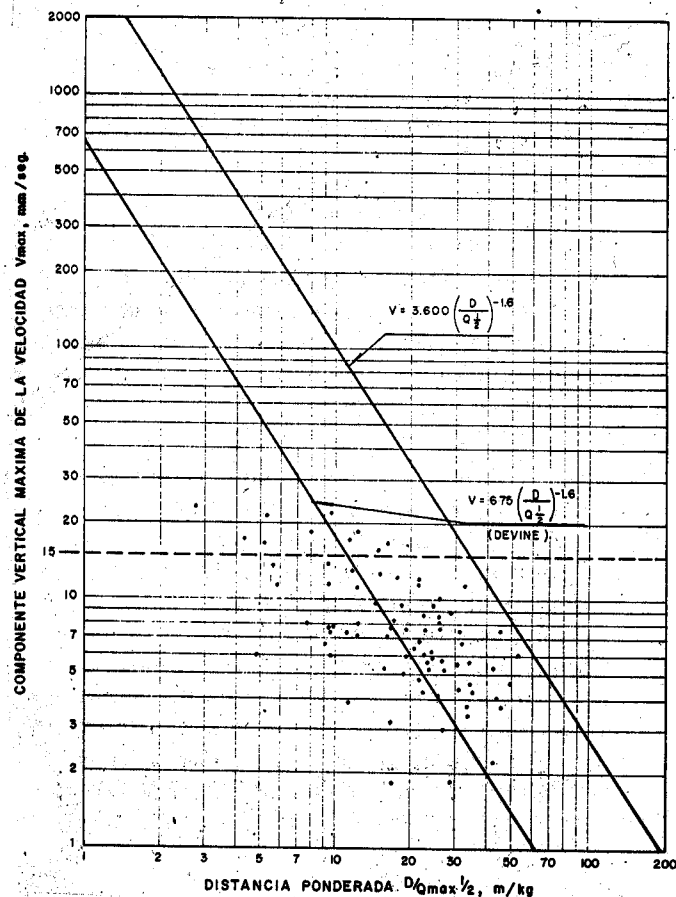


Fig. 4. Valores reales de la relación velocidad máxima-carga ponderada, medidos en un caso concreto de excavación subterránea en granito sano.

y Fogelson (1962) para edificios de viviendas. De entonces data el límite de $V = 50$ mm/seg. tan utilizado. E. R. T. recomienda, siguiendo al U.S.B. M., un valor inicial de $V = 30$ mm/seg. Actualmente se tiende a matizar mucho más y al estudiar el efecto de las vibraciones en zonas urbanas y pobladas se vuelve a diferenciar según la frecuencia, el estado de la estructura y el uso de los edificios (Véase por ejemplo Atlas Copco-1973, Ashley 1976, International Standards Organisation, Chae 1978). Sobre estos límites hay gran experiencia en pequeñas voladuras urbanas pero resultan muy conservadores para excavación en roca.

Realmente se producirá la rotura por tracción si

$$(H) \quad \sigma = \rho c V = \sigma_T$$

donde σ_T es la resistencia a tracción y

$$(I) \quad V_{crit} = \frac{\sigma_T}{\rho c}$$

Para una roca sana normal

$$\rho = \gamma / g = 2.700 \text{ Kg/m}^3 \times (9.8 \text{ m/seg}^2)^{-1}$$

$$C \sim 5.000 \text{ m/seg.}$$

y por lo tanto

$$(J) \quad V_{crit} (\text{mm/seg}) = \frac{\sigma_T (\text{Kg/cm}^2)}{1.4}$$

expresiones que nos permiten obtener la velocidad crítica a partir de ensayos sencillos: determinación de la celeridad de las ondas longitudinales en el terreno; de la densidad; y de la resistencia a tracción, por ejemplo con un ensayo brasileño.

- taludes 25 mm/seg. daños aislados
60 mm/seg. roturas en superficie
(según Bauer y Calder, 1971)
- túneles 30 mm/seg. caída de rocas
60 mm/seg. formación de grietas
(según Langefors y Kihlstrom, 1963)

en ambos casos con $V = 300$ mm/seg. se inicia la desorganización del macizo rocoso.

Con todas estas fórmulas queda resuelto el problema teórico de limitar la intensidad de las voladuras para que no dañen al cimiento, que ha de quedar sano. Hay además técnicas especiales como el precorte o el recorte que tienen una larga tradición.

Pero en la práctica industrial se imponen cada día más las perforaduras de gran diámetro (de 9" a 12" en minería a cielo abierto, de 6" a 9" en ingeniería civil) con gran separación entre taladros (es frecuente la regla empírica del pie de separación por pulgada de diámetro) y con voladuras de gran dimensión para abaratar y racionalizar la excavación. Se hace preciso limitar la carga por retardo y surge un concepto nuevo: la zonificación de la excavación atendiendo los medios de voladura.

Resulta instructivo comparar tres campañas de excavación: el aliviadero de la presa de Sta. Eulalia, la central nuclear de Sayago y el canal de derivación de la presa de Itaipu.

En Sta. Eulalia (1964-65) se perforó con martillo ligero en bancos de menos de 6 m. de potencia y con wagon-drill si la potencia oscilaba entre 6 y 10 m. En todos los casos el diámetro de boca de la perforación fué de 21/4". Las fases de perforación se organizaron atendiendo al sistema de carga del escombros y se terminaron con un precorte con separación entre taladros de 50 cm. - 1 m.

En Sayago (1976-77) la mayor parte de la perforación se realizó con una máquina Robbins RRT con una altura de banco de 10 m. y un diámetro de 9". Con objeto de evitar daños a la roca se adoptaron las siguientes reglas:

Distancia al límite de excavación	Diámetro de perforación
$d > 30$ m.	9"
$30 \text{ m.} > d > 18$ m.	4 1/2"
$18 \text{ m.} > d > 13$ m.	3 1/2"
$13 \text{ m} > d$	2 1/2"

y se utilizaron martillos convencionales para los diámetros inferiores. El volumen total de excavación fué de 2.700.000 m³.

En el canal de derivación de Itaipu (1976-77) se excavaron 5 bancos de 18 m. de altura media adaptándoles a la disposición geológica (basalto fisurado, basalto sano y brecha). En la parte central se perforó con diámetros de 6" con equipos Atlas

Copco Roc. Tanto en el acabado como en el precorte se emplearon perforadoras Ingersoll Rand "Drillmaster" con diámetros de 3" en las cercanías de las paredes laterales. El volumen total de excavación fue de 22.000.000 m³ con un ritmo mensual de más de 1.000.000 m³.

Tanto en Sayago como en Itaipu se realizaron voladuras de ensayo y se instrumentó la obra controlando con detalle el nivel de vibraciones.

El problema de las grandes excavaciones adopta pues nuevos aspectos tecnológicos motivados por la mecanización creciente de las operaciones de voladura que exigen pocos barrenos de grandes diámetros dispuestos en forma normalizada y con grandes voladuras.

Al mismo tiempo se quiere dañar lo menos posible la roca remanente y ello exige un estudio cuidadoso, ensayos in situ, una zonificación de las excavaciones y un control permanente de vibraciones durante la ejecución.

¿Y todo esto es realmente necesario?. Sí porque ese acabado determina la calidad del terreno de cimentación. Aunque eso sea irrumpir en un terreno ajeno permítaseme citar un solo ejemplo. Una de las hipótesis sobre la rotura de la presa de Teton, cita como causa al sifonamiento del material limoso de una pantalla impermeable situada dentro de una zanja excavada en roca, precisamente a través de fisuras abiertas dentro de la roca volcánica. El acabado de las paredes de la zanja excavada que parece malo, favorece notablemente la existencia de fisuras abiertas. Como se ve la excavación puede ser muy importante incluso en presas de tierra.

COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS RELATED TO DAM FOUNDATIONS (RIO, 1978)

- Dynamic Stresses from blasting vibrations: A Better damage criterion. Carlos Dinis da Gama.
- Vibration aspects on planning blasting for dam foundations. Carlos Manoel Nieble.
- Wave propagation laws: fundamental conditions for their objective and judicious determination. Luiz C. de Paula, Jose C. Saad, Lucia S. Dozzi.
- The control over rock blasting in the vicinity of a dam. José Elejabarrieta Pérez, Julián Feijoo Melle, Carlos G. Flores, Pedro Llamas García.

REFERENCIAS

- Ambraseys N. (1968). Capítulo VII en "Rock Mechanics in engineering practice" (edit. K. G. Stagg y O. C. Zienkewicz). Wiley, Londres. Hay traducción española en Blume.
- Ashley C. (1976). "Blasting in urban areas". *Tunnels and tunneling*. September.
- Atlas Copco (1973). "Let's talk about ground vibrations and their effect on people and buildings" ABEM printed matter N.º 90073.
- Bauer A. y Calder P. (1971) "The influence and evaluation of blasting on stability". *Proc. 1st Int. Conf. on Stability in Open Pit Mining*. Vancouver.
- Chae Y. S. (1978). "Design of excavation blast to prevent damage". *Civil Engineering* - ASCE. Abril.
- Duvall W. I. y Fogelson D. E. (1962). "Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations". *USBM Report n.º 5968*.
- Figueroa de la Guardia A. (1975). "Voladuras controladas". V. *Jornadas Minero-Metalúrgicas Nacionales*. Bilbao.
- International Standards Organisation. "Draft proposal on the evaluation and measurement of vibration in buildings". Citado por Ashley en *Tunnels and Tunneling*. Marzo 1977.
- Langefors U. y Kihlstrom B. (1963). "The modern technique of rock blasting". Wiley. New York.
- Oriard L.L. (1970). "Blasting operations in the urban environment". *Ass. Eng. Geol. Annual Meeting. Washington*.
- Romana M. (1975). "Nota sobre los problemas de similitud en las voladuras". *Seminario de Locomoción Extraviaria*. Madrid.
- Vortman L. J. (1963). "Cratering experiments with larg high explosive charges". *Geophisics*. Vol XXVIII n.º 3.