

EFFECTO DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR VOLADURAS EN EL HORMIGON DE ESTRUCTURAS - PRESA LOS CARACOLES

Alejo O. Sfriso

Facultad de Ingeniería – UBA

Jorge Grossi y Daniela Quinteros

Techint Ingeniería y Construcciones. Bouchard 557 Piso 13, Buenos Aires, Argentina.

Tel: (54) 011 - 40184303. e-mail: igrossi@techint.com

RESUMEN

La excavación de los túneles del aliviadero de la presa Los Caracoles se efectuó mediante perforación y tronadura de manera simultánea con el hormigonado de la estructura de control, por lo que debió estudiarse el efecto de las vibraciones inducidas por las tronaduras en el proceso de fraguado y endurecimiento de los hormigones. Cuando una onda mecánica se propaga por un macizo rocoso se producen deformaciones cuya amplitud depende de la amplitud de la onda en la fuente y de la distancia entre ésta y el punto de medición. Las vibraciones pueden tener un efecto adverso sobre el hormigón fresco y en proceso de endurecimiento. Por el lado de la acción, este efecto es función de la amplitud de la vibración y, en menor medida, de su frecuencia. Por el lado de la estructura, la tensión de tracción que se produce durante la etapa de extensión de la onda es función del módulo de Young del material en edad temprana, y debe ser comparada con la resistencia a la tracción del hormigón joven. Existen tres intervalos temporales bien distinguidos: i) el hormigón en proceso de fraguado tiene una relación resistencia-rigidez favorable que tolera vibraciones relativamente elevadas; ii) durante el endurecimiento temprano, la rigidez crece más rápidamente que la resistencia a la tracción, por lo que la tolerancia a vibraciones se reduce significativamente; y iii) durante el endurecimiento tardío el crecimiento de la resistencia a la tracción es suficiente para compensar el efecto de la mayor rigidez, por lo que la tolerancia a vibraciones crece hasta un valor final que es independiente de la edad del hormigón. El efecto de una onda sobre una estructura puede medirse por la velocidad límite, que es la velocidad máxima que un punto de la estructura puede soportar antes de producir daño. Se observa que la velocidad límite aumenta significativamente con la edad del hormigón y débilmente con la resistencia a la compresión. En este trabajo se presenta un resumen del problema de la propagación de ondas en un macizo rocoso, se analiza su efecto sobre hormigones jóvenes, se informan mediciones de la velocidad de propagación y se calibran las funciones de atenuación para el macizo de la embocadura de la presa Los Caracoles. Se presenta un ábaco de diseño de tiro que indica la máxima carga que puede quemarse en función de la distancia entre el punto de disparo y el punto de hormigonado para distintas edades de hormigón. Finalmente se informan los resultados de las mediciones de velocidades de onda realizadas en las estructuras del aliviadero durante voladuras efectuadas para la excavación de túneles, que comprueban que las velocidades de partícula inducidas altas no afectaron al hormigón de las estructuras de la embocadura.

PALABRAS CLAVE: propagación de ondas – vibraciones – hormigón fresco – hormigón joven.

INTRODUCCIÓN

Descripción de la obra

El complejo Hidroeléctrico Los Caracoles se encuentra sobre el río San Juan, a 53 km de la ciudad homónima. La presa de embalse es del tipo CFRD, con terraplén de gravas compactadas de más de diez millones de metros cúbicos de volumen y 136 metros de altura y pantalla de hormigón armado en la cara de aguas arriba. Embalsará 565 Hm³ y generará 715GWh anuales por medio de dos turbinas Francis. El embalse estará conectado a la central hidroeléctrica a través de un túnel de aducción de 1500 m de longitud, con una obra de toma excavada y revestida en hormigón donde se alojarán las compuertas de control del túnel y una chimenea de equilibrio. En la figura 1 se muestra una vista de la presa desde su cara de aguas arriba.



FIGURA 1. Vista de la presa Los Caracoles desde su cara aguas arriba.

El proyecto se completa con las obras del aliviadero de crecidas que consta de una embocadura con dos compuertas radiales y sendos túneles paralelos, con forma de cuello de cisne, de 10 metros de altura y 330 metros de longitud, ubicados en el macizo rocoso que constituye el estribo de margen izquierda de la presa. La obra se divide en cuatro sectores: a) la estructura de control en la embocadura; b) un tramo de fuerte pendiente que aloja la rápida; c) un tramo de conducción con pendiente reducida y d) la desembocadura. En la embocadura se alojan las estructuras de control, que son básicamente cajones de hormigón de 30 metros de altura, 29 metros de longitud y 13 metros de ancho que contienen el cimacio, la compuerta de sector, el sistema de izado y las recatas para ataguías. En la figura 2 se muestra el esquema del sistema aliviadero.

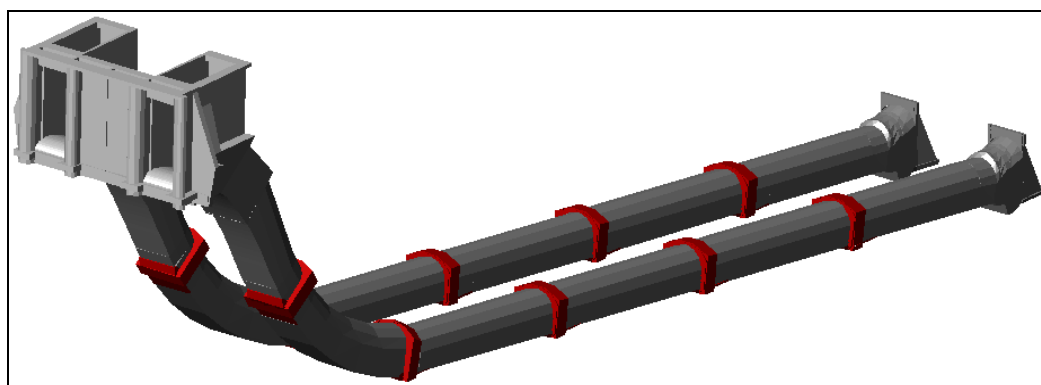


FIGURA 2. Esquema del Sistema Aliviadero- Los Caracoles

Descripción del problema analizado

La excavación de los túneles del aliviadero de la presa Los Caracoles se efectuó mediante perforación y tronadura de manera simultánea con el hormigonado de la estructura de control. Se debió minimizar la distancia entre el frente de excavación y la zona de hormigonado, por lo que se temió que las vibraciones inducidas por las tronaduras afectasen la calidad de las sucesivas etapas de hormigonado que estaban en proceso de colocación, fraguado y endurecimiento.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Velocidad límite de partícula

Cuando una onda mecánica se propaga por un medio elástico produce deformaciones de compresión y extensión, proporcionales a la velocidad máxima de partícula (ppv) y a la celeridad del medio c . Para el caso unidimensional vale

$$\varepsilon = ppv/c \quad (1)$$

La tensión de tracción dinámica σ_d que se produce durante la etapa de extensión de la onda es función del módulo de Young “dinámico” del material E_d . La expresión es:

$$\sigma_d = E_d \cdot \varepsilon \quad (2)$$

El daño se produce cuando σ_d alcanza a la resistencia a la tracción dinámica f_{td} . Reemplazando σ_d por f_{td} en la ec. (2) e insertando la ec. (1) se obtiene que la velocidad límite de partícula lpv es

$$lpv = \frac{f_{td}}{E_d} c \quad (3)$$

lo que permite apreciar que la velocidad de partícula que inicia el daño es directamente proporcional al cociente entre la resistencia a la tracción dinámica y el módulo de Young dinámico.

En un hormigón que está en proceso de endurecimiento, el cociente f_{td}/E_d varía con el tiempo de manera no lineal, por lo que la ec. (3) debe ser analizada en cada instante en el que se produzca una acción dinámica sobre la estructura en construcción. En lo que resta del artículo, se asume de manera simplificada que si en cualquier momento del proceso de endurecimiento se produce una vibración con $ppv > lpv$, se producirá fisuración en el hormigón.

Efecto de la edad del hormigón

El hormigón en proceso de fraguado tiene una relación f_{td}/E_d favorable que permite velocidades de partículas relativamente elevadas. Durante el endurecimiento temprano, E_d crece más rápidamente que f_{td} , por lo que la velocidad límite de partícula lpv se reduce significativamente. Durante el endurecimiento tardío, el crecimiento de f_{td} es más rápido que el de E_d , por lo que la lpv vuelve a aumentar hasta un valor final que es independiente de la edad del hormigón (Zhang et al 2005). Se aprecia que la lpv aumenta significativamente con la edad del hormigón y débilmente con la resistencia a la compresión, como se aprecia en las figuras 3 y 4 (Kwan et al 2005).

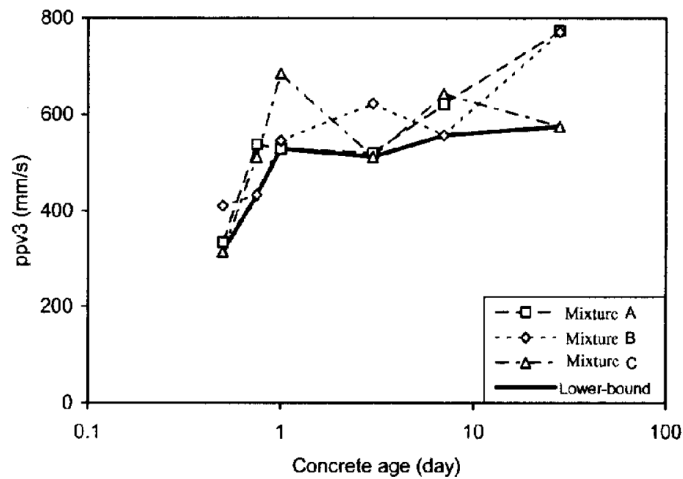


FIGURA. 3. Velocidad límite ppv en función de la edad (Kwan et al 2005).

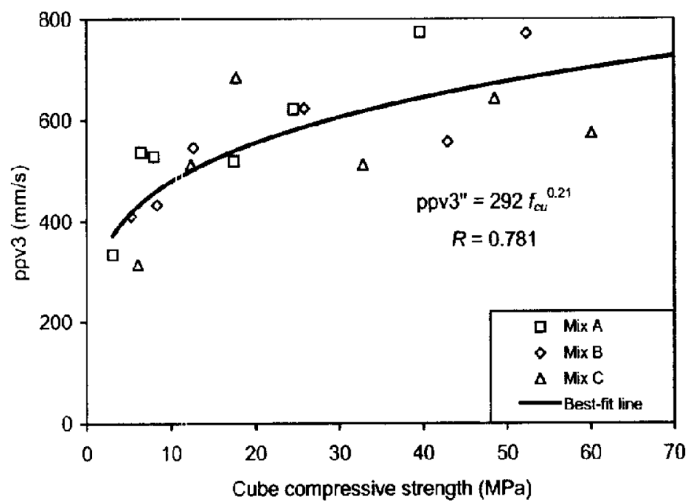


FIGURA. 4. Velocidad límite ppv en función de la resistencia (Kwan et al 2005).

Umbrales recomendados

Ansell y Silfwerbrand (2003) efectúan una revisión bibliográfica de las ppv toleradas para vibración continua y presentan la tabla 1. También presentan los umbrales de daño para vibraciones producidas por explosivos que se muestran en la tabla 2 y los valores admisibles recomendados que se muestran en la tabla 3. Por su parte, Kwan et al (2005) recomiendan el empleo de los umbrales de resistencia que se indican en la tabla 4 con factores de seguridad entre 3 y 5.

Tabla 1. ppv admisibles para diferentes tipos de estructura y edades de hormigón. Prácticas de la industria para vibraciones continuas (Ansell y Silfwerbrand 2003).

Structure to be protected	Old concrete, 7 days and older	Intermediate age concrete, 12 h to 7 days old	Young concrete, 0-12 h old
Nuclear power plant under construction	180	100	2.5
Nuclear power plant under construction	100	50	2.5
Eleven-storey office building under construction	100	50	5.0
Small sewage treatment facility and runway adjacent to mixed-face tunnel project	50	—	—
Two multi-storey retail stores and parking deck	100	50	2.5
Exhibition hall, mechanical building and mechanical tunnel	50	50	2.5
Fossil-fuel power plant under construction	100	50	2.5

Tabla 2. Velocidad límite de partículas para diferentes edades de hormigón.
Vibraciones producidas por explosivos (Ansell y Silfwerbrand 2003).

Concrete age: h	0-3	3-11	11-24	24-48	>48
Maximum particle velocity: mm/s	100	38	50	100	178

Tabla 3. Valores admisibles recomendados para vibraciones producidas por explosivos (Ansell y Silfwerbrand 2003).

	Concrete age	Max. allowed PPV: mm/s	Comments
Fresh concrete	0-3 h	100	Re-vibration may increase concrete strength
Young concrete	3-12 h	35	The velocity of heavy traffic must be limited
Early-age concrete	12-24 h	50	—
Almost hardened concrete	1-2 days	100	—
	2-7 days	175	—
Hardened concrete	7-10 days	225	—
	>10 days	300	—
Shotcrete on rock	0-1 day	250	—
	>1 day	500	—

Tabla 4. Velocidad límite de partícula en función de la edad del hormigón (Kwan et al 2005).

edad	12 h	18 h	24 h	3 d	7 d	28 d
l_{pv} [mm/s]	314	433	529	512	557	575

Debe notarse que, de acuerdo con la tabla 4 (Kwan et al 2005) la velocidad límite de partícula crece de manera continua durante las primeras 24 horas. Zhang et al (2005) analizaron el comportamiento de hormigones convencionales sometidos a diferentes niveles de vibración y presentaron los resultados que pueden verse en la fig. 5. Según esta figura, existe un lapso durante el endurecimiento inicial del hormigón en el que una vibración determinada produce una significativa reducción de la resistencia a la compresión. Para los materiales analizados, este lapso se produce entre 40 y 120 horas luego del hormigonado.

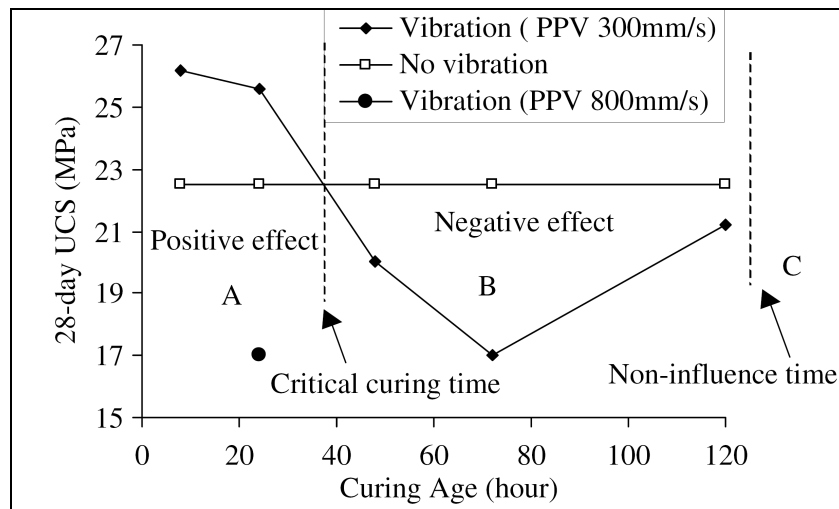


FIGURA. 5. Efecto de vibraciones intensas sobre la resistencia a compresión del hormigón convencional en función de su edad (Zhang et al 2005).

UMBRALES ADOPTADOS

Hormigón endurecido

Para elementos de hormigón endurecido se adoptó la fórmula indicada en la fig. 4 que, para H-30 arroja un valor

$$lpv = 292 \left(\frac{f'_c}{1MPa} \right)^{0.21} \frac{mm}{s} = 580 \frac{mm}{s} \quad (4)$$

Se adoptó un coeficiente de seguridad $FS=2$ por lo que la velocidad máxima permitida fue $ppv=290$ mm/s.

Hormigón joven en molde

Para elementos de hormigón moldeados se adoptaron los umbrales admisibles que se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Velocidad admisible de partícula en función de la edad del hormigón.

edad	0h – 3 h	3 h – 12 h	12 h – 24 h	1 d – 7 d	>7 d
ppv [mm/s]	100	50	75	$75+150 \log[t/1 \text{ dia}]$	200

Hormigón joven deslizado

Para hormigones jóvenes no confinados se especificó una velocidad máxima admisible uniforme para las primeras 24 hora es igual a $ppv=25$ mm/s.

CRITERIO DE AMORTIGUAMIENTO

La velocidad de partícula tiene una amplitud que es exponencialmente decreciente con la distancia a la fuente, y cuya ley de amortiguamiento depende de las propiedades elásticas del medio y de su densidad. Para el análisis del problema que se presenta se adoptó el criterio de amortiguamiento de Nichols (Zhang et al 2005)

$$ppv = k \left(\frac{\sqrt{Q/1kg_{TNT}}}{r/1m} \right)^\alpha \frac{mm}{s} \quad (5)$$

donde Q es la carga (en kg de TNT), r es la distancia a la fuente, y k y α son parámetros de ajuste que dependen del medio elástico. A partir de algunas mediciones de prueba y de acuerdo a los valores previamente publicados (Zhang et al 2005), se adoptó $k = 700$ y $\alpha = 2$, por lo que la máxima carga admisible Q es

$$Q = \frac{ppv}{700} r^2 \frac{kg_{TNT}}{m^2 \cdot mm/s} \quad (6)$$

ABACOS DE DISEÑO DE TIRO

La ec. (6) puede presentarse en forma de ábacos como se muestra en la figura 7. Estos ábacos permiten la selección de la carga admisible Q en función de la ppv tolerable para cada edad y tipo de hormigón.

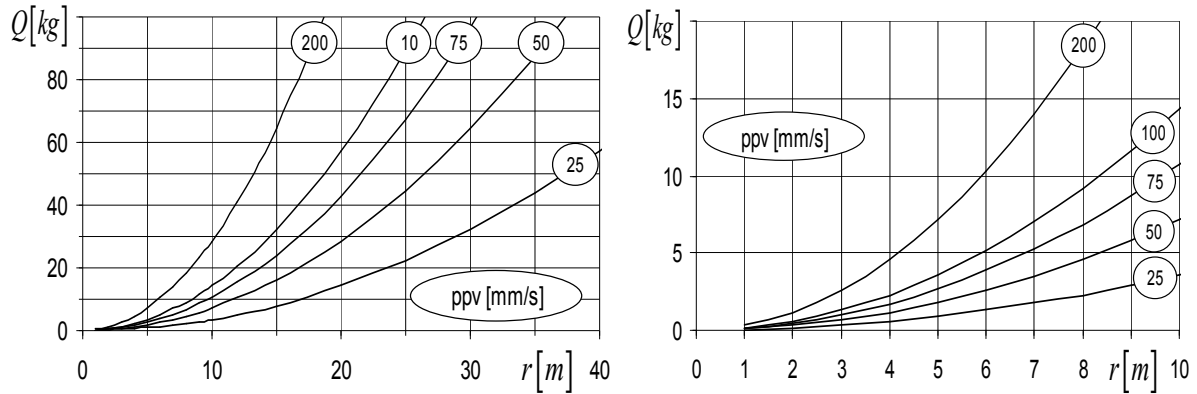


FIGURA 7. Carga Q de explosivos admisible en función de la distancia r a la fuente y de la velocidad de partícula máxima admitida ppv .

MEDICIONES IN SITU

En la tabla 6 se presentan resultados de mediciones de velocidad de propagación efectuadas con geófonos instalados en la embocadura y en el cuello de cisne de los túneles. Puede apreciarse que los valores obtenidos son, en todos los casos, inferiores al umbral de diseño de 200mm/s.

Tabla 6. Velocidades de partículas medidas para diferentes cargas de disparo y distancias entre fuente y geófono.

	Distancia a la fuente [m]	Carga utilizada [kg_{TNT}]	ppv [mm/s]
1	15	10.5	92.5
2	38	40.25	4.16
3	53	30	58.4
4	75	10.5	1.53

CONCLUSIONES

Durante la construcción de la obra del aliviadero de la presa Los Caracoles se requirió la ejecución simultánea de excavaciones por tronadura y el hormigonado de elementos estructurales con hormigones en molde y con encofrados deslizantes. Como las vibraciones producidas por las tronaduras pueden afectar adversamente la resistencia de los hormigones e inducir fisuración, se estudió el problema de la propagación de ondas mecánicas en el macizo rocoso y el efecto de las vibraciones sobre hormigones jóvenes y endurecidos. Con la información obtenida en la bibliografía se establecieron umbrales tolerables de velocidad de partícula para diferentes edades de los hormigones y se seleccionaron curvas de atenuación de la velocidad respecto a la distancia a la fuente. Estas curvas de atenuación fueron calibradas con algunas mediciones de prueba efectuadas en la zona de la embocadura del aliviadero de la presa Los Caracoles. Finalmente, se construyeron ábacos de tiro que permiten seleccionar la carga de tiro en función de la máxima velocidad de partícula permitida y de la distancia entre el punto de disparo y la estructura.

REFERENCIAS

- Ansell, A. y J. Silfwerbrand** (2003), "The vibration resistance of young and early-age concrete". *Structural Concrete* 4:3, 125-134.
- Kwan, A., W. Zheng y T. Ng** (2005), "Effects f shock vibration on concrete". *ACI Materials Journal* 102-M46, 405-413.
- Zhang, C., F. Hu y S. Zou** (2005), "Effects of blast induced vibrations on the fresh concrete lining of a shaft". *Tunneling and underground space technology* 20, 356-361.