

Estudio sismográfico del túnel de conducción a Central Hidráulica y Chimenea de equilibrio - aprovechamiento Hidroeléctrico Agua del Toro

Ing. Jorge Lázaro González ⁽¹⁾

Ing. Mario Carlos Vacirca

RESUMEN

El presente trabajo está basado en la aplicación de las fórmulas simples de la propagación de ondas elásticas de la teoría de la elasticidad y de la comparación de los valores obtenidos con ensayos de gran placa realizados en túnel de Agua del Toro.

El objetivo del mismo fue determinar el espesor de la corona descomprimida que se estimaba para la aplicación de la Fórmula de Marco Lelli, donde el espesor se estimaba en base al diámetro de la abertura (túnel y chimenea de equilibrio) la medición resultó inferior a dicha estimación por lo que se ahorraron alrededor de 30.000m de perforación en roca para consolidación de la misma y más de 2.000 tn. de cemento e hierro en la construcción del revestimiento del túnel y de la chimenea de equilibrio.

Hoy, a más de 15 años de inaugurada la obra, el túnel y la chimenea de equilibrio, ambos trabajaron normalmente.

ABSTRACT

This document is based on the application of simple formulas of the elastic wave propagation from the theory of elasticity and the comparison of the obtained values with tests of great plate carried out in Agua del Toro tunnel.

Its aim was to determine the thickness of the uncompressed crown considered for the application of Marco Lelli formula: where the thickness was calculated according to the opening diameter - equilibrium surge chamber y tunnel. The measurement resulted inferior to that estimation and thus it was saved nearly 30,000m. of rock drilling for its consolidation and more than 2,000 tn. of cement and iron in the tunnel coating and surge chamber building.

Now fifteen years later from the inauguration of the work both the tunnel and the surge chamber are normally operating.

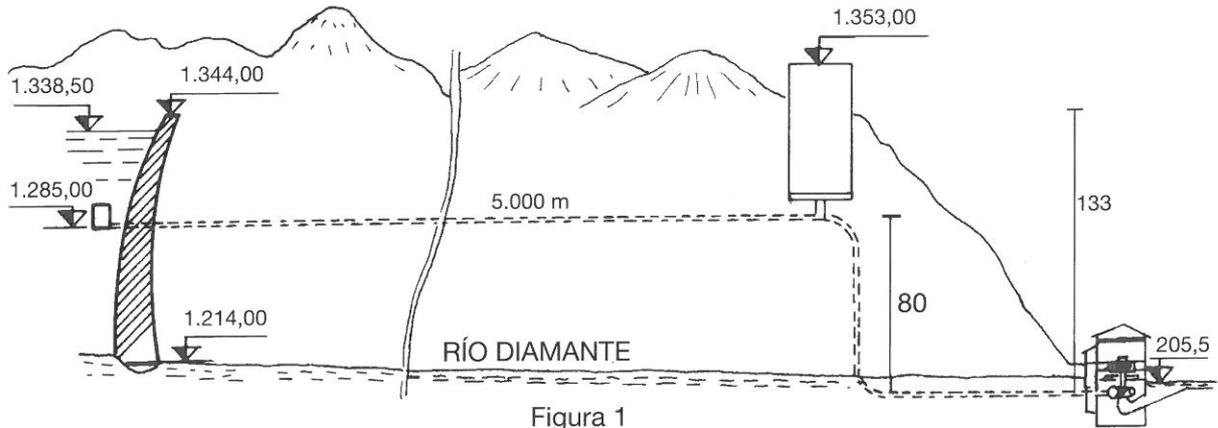
1 - Ubicación y descripción del proyecto Agua del Toro.

El proyecto de la Central Hidráulica Agua del Toro de 130.000 KW instalados y hoy en funcionamiento, se encuentra sobre el tramo medio del Río Diamante, en la Provincia de Mendoza.

1 - Profesor de la Cátedra Geofísica - Facultad de Ingeniería - U.N.C. Premio "Ing. Eduardo Baglietto", 1978, de la Academia Argentina de Ingeniería por su trabajo de investigación en Mecánica de Rocas para la represa Los Reyunos.

N. de R: El autor dedica esta publicación a la memoria del geólogo Dr. Alejandro Aníbal Palma.

Se compone de una presa bóveda de hormigón de 130 m. de altura que constituye el embalse cabecera del aprovechamiento del tramo del río mencionado, casi cinco km. de túnel para conducción de agua, chimenea de equilibrio y un edificio de máquinas con dos turbinas Francis de 65.000 KW c/u que aprovechan un salto útil de 133m. de altura. (fig. 1)



2 - Objeto de las Investigaciones Sísmicas

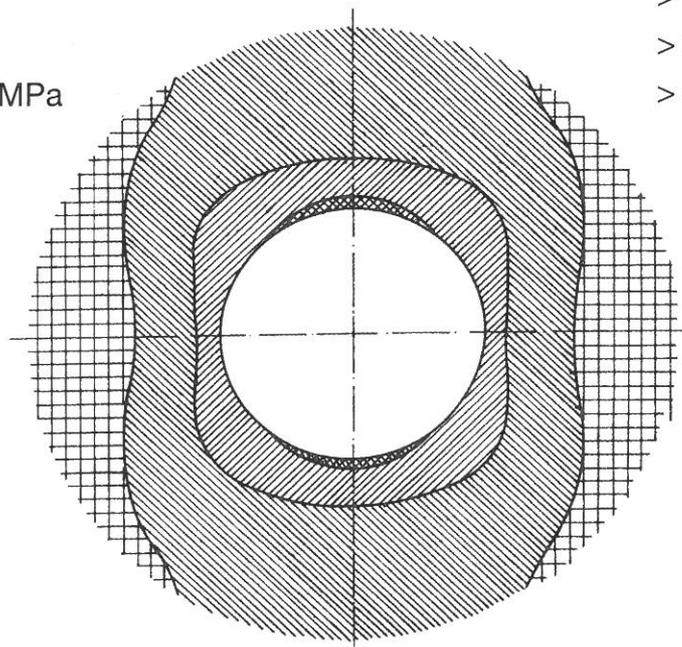
Se había previsto en el Contrato de Obras Civiles la ejecución de investigaciones sísmicas en las excavaciones de la galería de presión, de la chimenea de equilibrio y de la tubería forzada, que permitirán determinar el módulo elástico de la roca, el coeficiente de Poisson y el espesor de corona descomprimida. Luego, la metodología de cálculo establecida para la realización del proyecto constructivo, basada en las fórmulas de Marco Lelli permitiría verificar las tensiones en los revestimientos proyectados y establecer la presión inicial de consolidación del entorno de roca, en función de estos resultados obtenidos.

El método de los incrementos finitos y la aplicación del programa denominado de «Elementos de borde» nos lleva a un estado de distribución de tensiones alrededor de una abertura circular como el de la fig. 2.

$$Z = 300 \text{ mts.}$$

$$K = 1.25 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 11.78 \text{ MPa}$$



FACTOR DE SEGURIDAD

> 1 < 2	
> 2 < 4	
> 4 < 6	
> 6	

Figura 2

La aplicación del modelo matemático está condicionada por el requerimiento de los parámetros geomecánicos que deben alimentar al mismo.

Estos parámetros geomecánicos serán utilizados a posteriori para la realización del proyecto constructivo.

3 - Consideraciones Teóricas

Un postulado básico para la interpretación de cualquier trabajo sismográfico es el denominado "Postulado del comportamiento elástico reológico general".

«En la naturaleza no existen cuerpos ideales; todo material posee en mayor o menor grado todas las propiedades elásticas reológicas.»

En virtud de ello y como consecuencia de la excavación de túneles y galerías se alteran en el interior de los macizos los estados tensionales dando origen a modificaciones de los parámetros elásticos que caracterizan al mismo. Estas modificaciones, sumadas a la presión de la montaña hacen que las rocas tiendan a deformarse, fisurarse o desplazarse afectando la estabilidad de los hastiales y bóvedas.

Estas deformaciones permiten aplicar el concepto de que el fraccionamiento de una deformación finita en distintos pasos de deformación infinitesimal nos lleva a un estado final finito por deformación progresiva del medio; lo que en definitiva significa poder aplicar las leyes generales de la reología de las rocas.

El parámetro tiempo juega un papel fundamental puesto que las deformaciones mencionadas pueden producirse rápidamente, a medida que la excavación se realiza o bien con retardos de tiempos prolongados, siendo los parámetros viscosidad del medio y contextura estructural de las rocas las que en definitiva gobiernan el modo de deformación.

De acuerdo con los modernos conceptos geomecánicos, los macizos rocosos son medios complejos distribuidos en elementos estructurales de diverso orden.

De la consideración del tamaño de estos elementos estructurales surgen las propiedades denominadas **Geneidad y Tropía** que en definitiva son conceptos referidos a la distribución geométrica y dirección de dichos elementos estructurales en el ambiente considerado.

Como postulado básico para ambas propiedades se puede enunciar, desde el punto de vista geomecánico que: si un macizo rocoso es estructuralmente homogéneo e isótropo; también es isótropo y homogéneo en sus propiedades físicas. Por el contrario un macizo estructuralmente heterogéneo y anisótropo no tiene por qué ser heterogéneo y anisótropo en sus propiedades físicas.

Si bien la mecánica de los medios continuos vincula a la homogeneidad con la densidad, debe dejarse en claro que la densidad de un cuerpo debe ser considerada como una magnitud vectorial y como consecuencia de que la materia está compuesta por partículas discretas, la homogeneidad de un cuerpo real debe ser considerada como una homogeneidad estadística.

Las propiedades físicas y mecánicas surgidas del concepto de geneidad y tropía son gobernadas por las propiedades primitivas de las rocas, condicionadas por su génesis litológica, composición mineralógica, distribución de tensiones, elementos de relleno de fracturas, etc.

Estos elementos citados son causa de heterogeneidad en el macizo bajo estudio, pero cuando algunos de ellos como la estratificación, diaclasamiento, etc., se presentan en forma regular, producen estados de cuasi-isotropía que pueden ser estudiados por métodos sismográficos.

La aplicación de los métodos sismográficos como complementarios de los estudios geológicos, geotécnicos, etc., permiten obtener un conocimiento más amplio de los sistemas en estudio.

El macizo rocoso, se encuentra originalmente en un estado de equilibrio que es modificado como consecuencia de la excavación del túnel; dichas modificaciones están vinculadas al diámetro de la abertura, estado tensional previo a la excavación, espesor de la tapada, tipo de roca, condiciones estructurales, etc.

El método de los incrementos finitos y la aplicación del programa denominado de "Elementos de

borde" nos lleva a un estado de distribución de tensiones alrededor de una abertura circular como el de la fig. 2.

La aplicación del modelo matemático está condicionada por el requerimiento de los parámetros geomecánicos que deben alimentar al mismo.

Estos parámetros geomecánicos serán utilizados a posteriori para la realización del proyecto constructivo.

La determinación de los parámetros geomecánicos en forma dinámica está vinculada en forma directa con la teoría de la elasticidad y la validez de los resultados obtenidos, está relacionada con las hipótesis efectuadas con el objeto de obtener fórmulas matemáticas que permitan cuantificar dichos parámetros.

Por ejemplo, se puede determinar que, para el caso de un sólido infinito isótropo homogéneo y perfectamente elástico (cuerpo de Hooke) las velocidades de propagación de una perturbación elástica están definidas por:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

V_L = Velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

V_T = Velocidad de propagación de las ondas transversales.

λ y μ = Constantes de Lamé.

ρ = Densidad.

Las constantes de Lamé están en función del coeficiente de Poisson (ν) y del módulo de elasticidad longitudinal (E) o de Young.

Conocidas las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales, la densidad, y operando matemáticamente, se pueden determinar los siguientes parámetros elásticos dinámicos:

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (\text{Coeficiente de Poisson})$$

$$E = \frac{V_L^2(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Módulo de elasticidad longitudinal o de Young})$$

$$G = \rho V_L^2 \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (\text{Módulo de elasticidad transversal})$$

$$K = \rho V_L^2 \frac{(1+\nu)}{3(1-\nu)} \quad (\text{Módulo Volumétrico})$$

$$\lambda = \rho V_L^2 \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (\text{Primera constante de Lamé})$$

$$\mu = \rho V_L^2 \frac{(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \quad (\text{Segunda constante de Lamé})$$

Si se introducen los conceptos reológicos clásicos, es decir, si se considera el sistema visco elástico (cuerpo de Maxwell-Kelvin), las ecuaciones anteriores se ven modificadas con la introducción de las variables: frecuencia de la perturbación (ω), coeficiente de atenuación (α) y viscosidad del medio (η).

La ecuación de propagación de una onda plana en un medio visco elástico infinito puede ser escrita bajo la forma:

$$\lambda + 2\mu \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} + \rho \eta \frac{\partial^3 \nu}{\partial x^2 \partial t} - \rho \frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} = 0$$

de operar matemáticamente se obtiene:

$$\eta = \frac{2\alpha V_L^3 \omega^2}{(\omega^2 + \alpha^2 V_L^2)^2}$$

En el caso de que la atenuación sea nula (cuerpo elástico ideal) $\eta = 0$.

La solución de la ecuación diferencial para el medio visco elástico nos conduce a:

$$\lambda + 2\mu = \rho V_L^2 \omega^2 \frac{\omega^2 - \alpha^2 V_L^2}{(\omega^2 + \alpha^2 V_L^2)^2}$$

donde la velocidad de propagación está vinculada con la frecuencia de la perturbación.

El producto ρV_L^2 debe ser tenido muy en cuenta puesto que si se considera que la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia, resulta:

$$\lambda + 2\mu = E_e \frac{1-\nu_e}{(1+\nu_e)(1-2\nu_e)}$$

El sub-índice e significa estático.

El producto ρV_L^2 está ligado al módulo dinámico

$$\rho V_L^2 = E_d \frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}$$

El sub-índice d significa dinámico.

De las ecuaciones anteriores se puede escribir que:

$$\frac{E_e}{E_d} = \omega^2 \frac{\omega^2 - \alpha^2 V_L^2}{(\omega^2 + \alpha^2 V_L^2)^2}$$

La relación entre ambos módulos, estático y dinámico, está vinculada al coeficiente de atenuación; la frecuencia fundamental de la perturbación y lógicamente, a la velocidad de propagación de la onda longitudinal.

Idéntico tratamiento se puede realizar para el estudio de las ondas transversales.

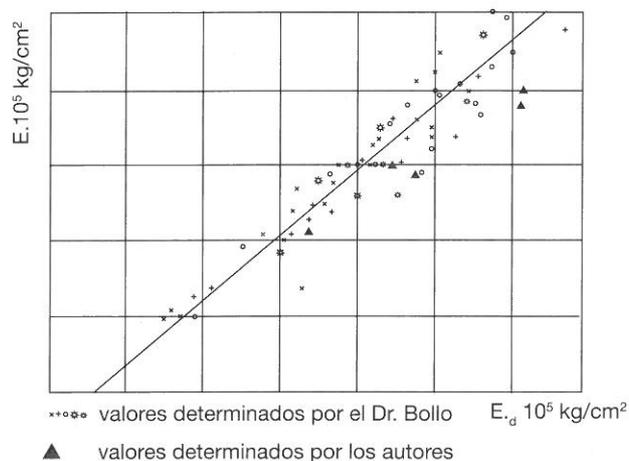
La determinación de la frecuencia de la perturbación se realiza aplicando el análisis de Fourier al registro, previa digitalización del mismo, resultando un espectro y no una frecuencia única.

El coeficiente de atenuación es uno de los factores más complejo de definir, por cuanto el mismo es variable y está en función de las propiedades de geneidad y tropía de la zona del macizo estudiado, razón por la cual la aplicación de estas metodologías resultan complejas, siendo la validez de los resultados más que aceptables.

El método denominado "Petit Sismique" ha adquirido preponderancia a nivel mundial y está basado en la aplicación de la metodología aplicada anteriormente.

Otra manera de encarar el estudio de la divergencia en la determinación de los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, es correlacionar los valores obtenidos con ensayos "in situ" en forma estática.

Los valores del gráfico fueron determinados por el Dr. Mariano Fernández Bollo y los autores del presente trabajo con colaboradores, permitiendo el mismo definir ecuaciones de regresión que vinculan los valores de módulos de elasticidad estáticos con los valores dinámicos obtenidos por el método clásico.



Debe tenerse en cuenta que para el caso de determinar los parámetros elásticos mediante el método clásico de definir las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales en un sistema real (no ideal) las divergencias en los valores obtenidos se verán incrementados por los siguientes efectos:

a) Tiempo de aplicación de la carga:

En el caso de los ensayos estáticos la carga se aplica lentamente y la transformación es adiabática; en el caso del impulso dinámico, la carga se aplica en el orden de milisegundos y la transformación es isotérmica.

b) Longitud del tendido sísmico:

Tiene importancia fundamental en la determinación de velocidades. En general la descompresión superficial del macizo rocoso hace que las velocidades superficiales sean menores que las profundas y la longitud del tendido tiene relación con la profundidad de investigación.

c) Dirección del tendido sísmico:

En la mayoría de los macizos rocosos, existen direcciones de diaclasamiento y de estructuras predominantes, razón por la cual, si la dirección del dispositivo sísmico es normal a la de las estructuras, la velocidad determinada será menor que en el caso de registrar el sentido estructural predominante.

d) Influencia del agua en el interior del macizo:

Está plenamente demostrado que la velocidad de propagación de las ondas longitudinales es superior en macizos saturados o con alto contenido de humedad que en aquellos que están secos; el hecho de que la velocidad de propagación longitudinal y el módulo estén relacionados en forma directa, provoca un alto grado de divergencia.

e) Estado tensional del macizo:

Dado que las velocidades de propagación de las ondas elásticas están vinculadas a los parámetros elásticos del macizo (Constantes de Lamé λ y μ) y éstos a su vez dependen del estado tensional del mismo, las determinaciones de los módulos se ven afectadas por dicho estado.

4 - EFECTOS DE DECOMPRESIÓN

Debe analizarse el estudio de la descompresión que se produce por efecto de la excavación en los alrededores de ésta. En general se puede definir como "Corona Decomprimida" a la roca alterada en sus propiedades elásticas en forma irreversible alrededor de la excavación. Fig. 4. Se pueden distinguir dos zonas dentro de la corona, la primera inmediata a la pared de la excavación (Zona I) está originada por la disminución de la presión intersticial y por las vibraciones de las cargas explosivas, estos fenómenos originan aperturas de las diaclasas produciendo una descompresión por dilatación de la roca, dicha descompresión produce una modificación del estado de cuasi isotropía que altera en forma apreciable la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales. La segunda zona está estrechamente vinculada con la variación de las constantes elásticas del macizo, (Zona II) en ella las diaclasas permanecen cerradas y el comportamiento dinámico varía fundamentalmente en función del estado de tensiones internas residuales (relajación). Las variaciones de la velocidad de propagación no es tan apreciable como en la primer zona.

Como límite exterior de esta zona se encuentra el macizo cuyas propiedades dinámicas no se han modificado por efecto de la excavación (Zona III).

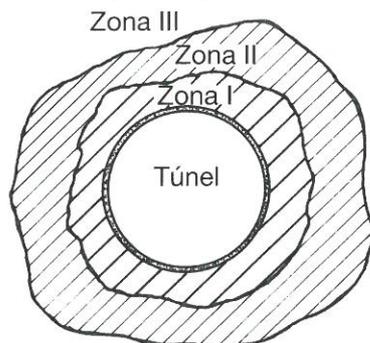


Figura 4

5 - ASPECTO GEOLÓGICO

Las obras de conducción a Central Hidráulica han sido excavadas en la formación denominada Serie del Imperial. Las rocas atravesadas por el túnel de conducción y chimenea de equilibrio son en general areniscas cuarcíticas de grano fino a grueso hasta conglomerádico, intercaladas con lutitas y esquistos, existen intrusiones de rocas metamórficas.

En la chimenea de equilibrio, en su parte superior existen pumitas que van pasando a tobas con arenas cuarcíferas hasta encontrar arenisca de granulometría variable con intercalaciones de arcillitas.

Las fallas encontradas durante la excavación corresponden a líneas tectónicas generales y en algunos casos a fallas subsidiarias de las mismas.

Para la interpretación de los resultados, se dispuso de dos relevamientos geológicos, uno de superficie realizado por el Dr. A. A. Palma y el correspondiente a las excavaciones realizadas por los geólogos Dr. Antelo Pérez y Dr. Di Salvo.

En la figura N° 5 se observa el perfil geológico general realizado por el Dr. Palma y en los planos N° 1, 2, y 3 el relevamiento de las excavaciones.

Continuará en el próximo número.



Esim S.R.L.

REPARACION DE:

- BOMBAS
- TURBINAS-COMPRESORES
- VALVULAS-SELLOS MECANICOS
- MAQUINADO-SERVICIO DE MANTENIMIENTO DE PLANTA DE PROCESOS CONTINUOS

PRECERTIFICADOS BAJO NORMAS ISO 9000

EMPRESA DE SERVICIOS INDUSTRIALES MECANICOS S.R.L.

Roque Sáenz Peña 1940 - (5507) - Lujan de Cuyo Mendoza Arg.
Tel./Fax: 0054 61 982308 - Parque Industrial (061) 985249