

APLICACION DE METODOS DINAMICOS AL ESTUDIO DE MACIZOS ROCOSOS

Ing. Jorge Lázaro González
Ing. Mario Carlos Vacirca

RESUMEN

El presente artículo tiene por objeto poner de manifiesto la importancia adquirida en los últimos tiempos por los métodos de ensayos dinámicos en el estudio de macizos rocosos. Fundamentalmente estos métodos se emplean para determinar la calidad del macizo, Módulo de Elasticidad Dinámico, Módulo de Elasticidad Estático probable, espesor de la descompresión en las excavaciones, daños ocasionados por las voladuras, estabilidad de excavaciones, profundidad de bulonaje, etc.

En primer término se exponen los principios fundamentales de la Teoría de propagación de ondas elásticas; en segundo lugar se indican someramente los métodos de ensayos dinámicos sobre testigos de roca en laboratorio y en tercer lugar los resultados obtenidos por los métodos de pequeña sismica, sismografía convencional y los de laboratorio.

La aplicación de los métodos de prospección geofísica (Dinámicos) al estudio de macizos rocosos, donde se han de implantar obras civiles de envergadura, tales como presas, caminos, túneles, centrales hidroeléctricas, etc., está tomando gran importancia, debido a que los costos de estudios son relativamente bajos, cumplimentan con eficiencia a los estudios geológicos y geomecánicos, aportando información básica para los profesionales proyectistas.

En el presente artículo se analizan los fundamentos teóricos de la propagación de ondas elásticas, teoría básica de vibraciones en testigos de rocas y los dos métodos dinámicos utilizados para la determinación de Módulo Elástico o Módulo de Young dinámico.

INTRODUCCION TEORICA

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

De la consideración del tamaño de estos elementos estructurales surgen las propiedades denominadas GENEIAD y TROPIA, 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 el sentido físico; por el contrario, un macizo estructuralmente heterogéneo y anisótropo no tiene por qué ser heterogéneo y anisótropo en sus propiedades físicas.

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 litología, composición mineralógica, distribución de tensiones, contenido de agua, elementos de relleno de fracturas, etc.

Estos elementos condicionantes 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 un estado de cuasianisotropía que puede ser estudiado por métodos indirectos como son los geofísicos.

En el caso de aplicación de los métodos sísmicos, éstos brindan una información adicional sobre las propiedades dinámicas de las rocas y por ello de las condiciones del macizo; son métodos complementarios de los estudios geológicos, hidrogeológicos; geotécnicos, etc. que permiten obtener un conocimiento más amplio de los sistemas en estudio.

Los trabajos sismográficos a realizar sobre los macizos que son investigados se pueden clasificar en 3 grupos, cada uno de los cuales depende del tipo de información que se desea obtener.

- 1) Perfiles sísmicos superficiales, con tiros longitudinales y transversales, el espaciamento entre receptores sismográficos está comprendido entre 5 y 20 metros. Este tipo de registración permite obtener rasgos estructurales generales.
- 2) Observaciones sísmicas en excavaciones, la distancia entre receptores sismográficos puede variar entre 0,5 y 5 metros. Permiten definir detalles menores tales como efecto de descompresión, efectos de fracturación por uso de explosivos, cambios litológicos, etc.
- 3) Estudios de perfiles sísmicos realizados en perforaciones, ya sea por el método de perfilaje sónico (Sonic Log) o bien con los métodos clásicos de construcción de dromocronas verticales o registros entre pozos. En general son trabajos de mucho detalle para estudios muy localizados.

Para la interpretación básica de los trabajos geosísmicos debe tenerse muy en cuenta, que estos ensayos involucran grandes volúmenes de roca y por lo tanto los datos obtenidos son característicos del macizo en forma global.

A continuación se exponen algunos rasgos básicos de la teoría de propagación de ondas elásticas.

La generación de las ondas elásticas a ser registradas, puede efectuarse de dos maneras: una primera que consiste en excitar el sistema con un impacto o detonación de cargas explosivas, la segunda, con la utilización de vibradores que permiten aplicar frecuencias constantes, o bien espectros definidos de frecuencia.

El presente trabajo se refiere al método por impacto o explosivo. En este caso se forma una onda de choque que recorre el cuerpo rocoso en una combinación de ondas longitudinales (compresionales), transversales (cizallamiento) y superficiales. Las velocidades de propagación de estas ondas son características del tramo rocoso donde se efectúa la medición.

La aplicación de las condiciones ideales de homogeneidad e isotropía conducen a las siguientes características de propagación de un frente de onda.

- a) La propagación del frente de onda tiene forma esférica, por lo que las velocidades de las ondas de cuerpo son independientes de la dirección de propagación.
- b) La disminución de la amplitud de las ondas, está directamente vinculada con la distancia al punto de explosión, a la duración del impulso de excitación y a las características geológicas del macizo.
- c) La magnitud absoluta de la amplitud de onda depende de la intensidad de excitación, confinamiento del explosivo, del tamaño de la cavidad equivalente originada por el explosivo, etc.

Las consideraciones de homogeneidad e isotropía permiten aplicar las ecuaciones de NAVIER.

$$\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\delta \Delta}{\delta x} + \mu \nabla^2 u + \rho X$$

$$\rho \frac{\delta^2 v}{\delta t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\delta \Delta}{\delta y} + \mu \nabla^2 v + \rho Y$$

$$\rho \frac{\delta^2 w}{\delta t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\delta \Delta}{\delta z} + \mu \nabla^2 w + \rho Z$$

Δ = Tensiones Volumétricas

λ y μ = Constantes de Lamé

∇ = Operador de Laplace

ρ = densidad

ρX ; ρY ; ρZ = fuerzas de cuerpo

u , v y w = Comp. del movimiento

Si se toma en cuenta que el tensor de deformación se puede descomponer:

- en su parte hidrostática (esférica isotrópica), que representa un cambio en la longitud (distensión) de una fibra en las direcciones X; Y o Z del cuerpo y en relación con su largo original (cambio de volumen).
- y en su parte desviatoria que representa distorsiones angulares por lo que se la denomina desviador de deformación, que produce distorsiones libres de cambios volumétricos, los movimientos de las ecuaciones

de Navier pueden descomponerse en dos ecuaciones de onda de distinto tipo denominadas ondas de presión y ondas de cizallamiento.

Se pueden resolver las ecuaciones de propagación y calcular la velocidad de propagación para ambos tipos de onda.

Para las ondas de presión u ondas longitudinales la velocidad de propagación es

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

Para las ondas transversales o ecuación de cizallamiento con una velocidad

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Estas ecuaciones pueden ser escritas como función del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson ν .

$$V_L = \left[\frac{E(1-\nu)g}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2}$$

$$V_T = \left[\frac{Eg}{2\rho(1+\nu)} \right]^{1/2}$$

En este caso E representa el módulo de elasticidad dinámico, equivalente al módulo de elasticidad estático a confinamiento cero y ν el coeficiente dinámico de Poisson, que puede calcularse mediante el conocimiento de las velocidades longitudinales y transversales.

Para distancias suficientemente grandes, el frente de onda puede ser considerado plano por lo que los movimientos de las partículas son paralelos (longitudinales) o perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación.

Todo lo visto anteriormente es válido para cuerpos perfectamente elásticos, pero en general, los macizos rocosos son visco-elásticos.

Para el estudio de estos sistemas y por tratarse de ondas, se pueden aplicar 2 puntos de vista diferentes:

Uno, estudiar el comportamiento de un punto del sistema donde resultarían ecuaciones que tienen por variable al tiempo o bien, analizar la influencia de la onda en el medio en que se propaga y estudiar la influencia de dicha onda sobre el total de puntos del sistema; esta forma de encarar el estudio conduce a ecuaciones con dos variables: tiempo y distancia desde el punto de excitación.

Mediante la teoría de propagación de una onda plana en un medio visco-elástico, se obtiene la siguiente ecuación de onda para un medio visco-elástico infinito:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \rho \eta \frac{\delta^3 u}{\delta x^2 \delta t} - \rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = 0$$

η = viscosidad

de la que se encuentra una solución que corresponde a la que se observa en la realidad, una solución vibratoria que se atenúa exponencialmente con la distancia, esto es:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} e^{i\omega(t - \frac{x}{V_L})}$$

donde A es la amplitud a una distancia X y A_0 es la amplitud de onda a la distancia X_0 (referencia), α es el coeficiente de atenuación; V_L la velocidad de propagación y ω la pulsación o frecuencia angular.

Se puede observar que la disminución de la amplitud de una onda en un medio visco-elástico respecto del punto de excitación, resulta en primer término, función de la distribución geométrica de la energía sobre una superficie esférica mayor y por otro lado las características visco-elásticas nos conducen a una absorción que depende de la forma y duración del impulso.

El problema básico de resolver en este estado, es la vinculación de los parámetros geofísicos que podemos medir V ; α y ω con los parámetros geomecánicos que se desea determinar λ , μ , ρ , η .

La ecuación de onda plana en un medio visco-elástico puede ser escrita bajo la forma

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} + \frac{\rho \eta}{\lambda + 2\mu} \frac{\delta^3 u}{\delta x^2 \delta t} + \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = 0$$

operando matemáticamente con ecuación de la amplitud se puede determinar:

$$\eta = \frac{2 \alpha V_L^3 \omega^2}{\omega^2 + \alpha^2 V_L^2} [L^2 T^{-1}]$$

se puede observar que si la atenuación es nula $\eta=0$ y se está en el caso clásico del medio elástico.

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

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

Por teoría de la elasticidad se estudia:

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

donde el subíndice "e" significa estático. El producto $\rho \cdot V^2$ está ligado al módulo dinámico.

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

El subíndice "d" significa dinámico.

Por lo que se puede escribir:

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

que es una ecuación que relaciona los módulos de elasticidad con los parámetros que se pueden medir con los métodos sísmográficos.

Respecto del coeficiente de amortiguamiento se puede expresar, que para macizos rocosos geológicamente condicionados por sistemas de anisotropía regular (sistemas de fallas, diaclasas, planos de estratificaciones) o bien por heterogeneidades litológicas deben esperarse coeficientes de atenuación mayores en dirección paralela a las zonas de menor velocidad de propagación y viceversa.

Esto es debido a que la simetría esférica de propagación se pierde por efecto de la anisotropía y la heterogeneidad.

Un planteo similar puede realizarse para las ondas transversales donde la ecuación de propagación de la onda plana para un medio visco-elástico viene dada por:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} + \frac{\rho \eta}{\mu} \frac{\delta^3 v}{\delta x^2 \delta t} - \frac{\rho}{\mu} \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = 0$$

donde

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

obteniéndose una relación entre el módulo estático y módulo dinámico.

$$\frac{E_e f(\nu_e)}{E_d f(\nu_d)} = \omega^2 \frac{\omega^2 - \alpha^2 V_T^2}{\omega^2 + \alpha^2 V_T^2}$$

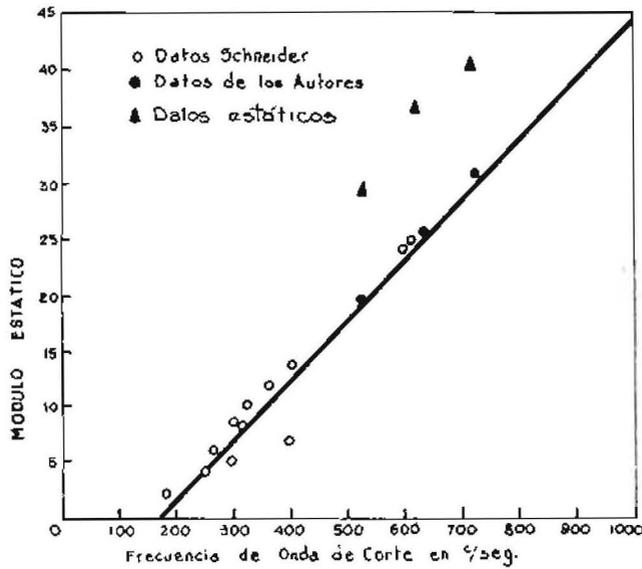
Relación que es idéntica a la obtenida para las ondas longitudinales.

Con la determinación de la frecuencia de las ondas transversales y ensayos in situ realizados se construye un gráfico que relaciona ambos parámetros (Schneider, 1967).

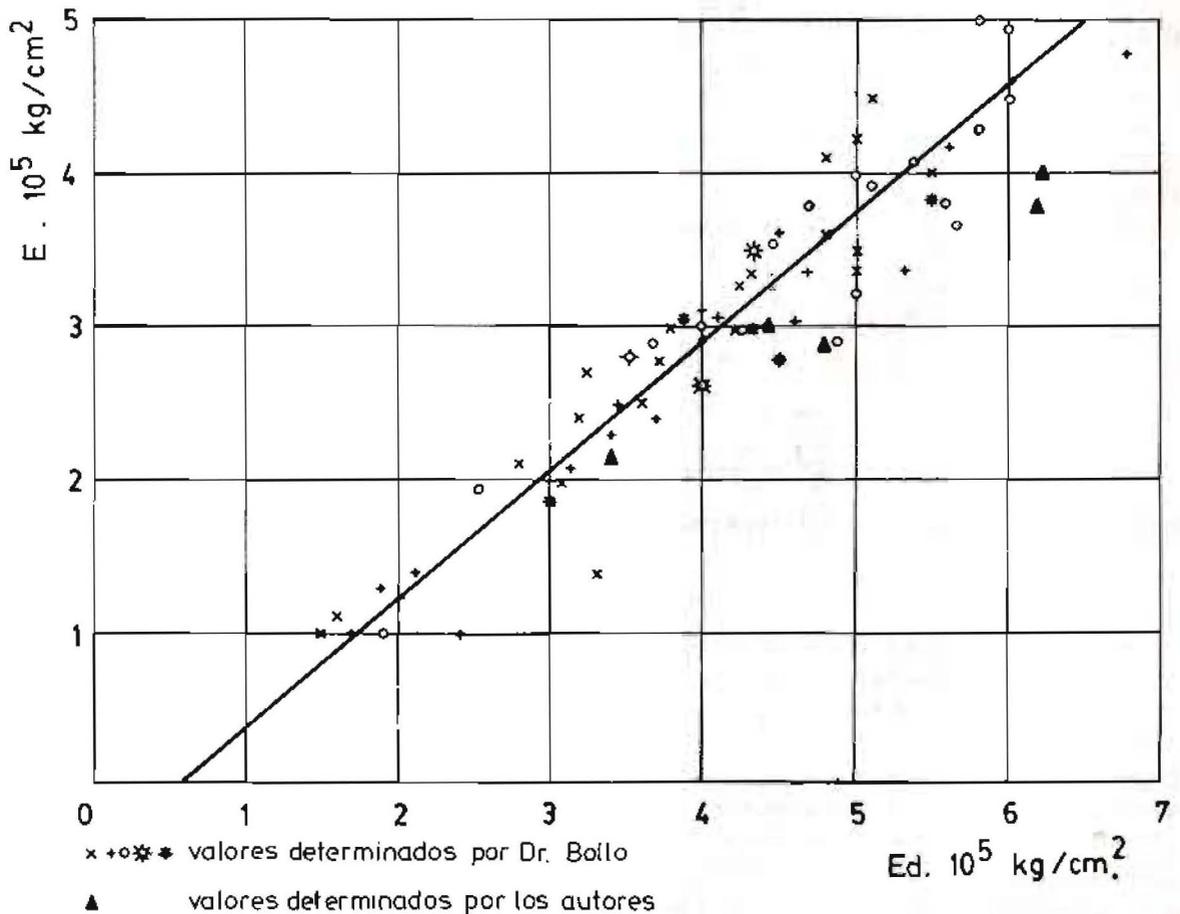
Donde el módulo de elasticidad obtenido por la denominada PEQUEÑA SISMICA viene dado por:

$$E_M = 0,054 f - 9.2 \text{ (G Pa)}$$

f = frecuencia de las ondas transversales



De la comparación de los valores del módulo elástico dinámico obtenido por el método convencional del cálculo de las dos velocidades V_L , V_T y por consiguiente ν , con los valores obtenidos mediante ensayos in situ realizados por el Dr. Mariano Fernández Bollo se obtienen las siguientes ecuaciones de correlación que relacionan los dos módulos de elasticidad:



Ortogonal	$E = -0,47 + 0,84 E_d$
Lineal	$E = -0,31 + 0,7 E_d$
Potencial	$E = 0,58 E_d^{1,14}$
Exponencial	$E = 0,7 e^{0,31 E_d}$
Parabólica	$E = -0,37 + 0,83 E_d - 0,0045 E_d^2$

De las ecuaciones anteriores, las que mejor se adaptan son la ortogonal y la parabólica aunque en ambos casos para $E_d = 0$ el valor sería negativo, hecho que físicamente no tiene sentido.

De lo expuesto en la teoría se observa que existen divergencias en los valores del módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático (este último determinado mediante ensayos in situ).

En nuestro caso para las determinaciones del módulo dinámico mediante el método clásico de determinar las velocidades de propagación, de las ondas longitudinales y transversales, las divergencias están fundamentalmente originadas por los siguientes hechos.

1) 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.

2) 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.

3) 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 según el sentido estructural predominante.

4) 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 aquéllos que están secos, el hecho de que la velocidad de propagación al cuadrado y el módulo estén relacionados directamente provoca un alto grado de divergencia.

5) Estado tensional del macizo

Dado que las velocidades de propagación de las ondas elásticas están vinculadas a los parámetros elásticos del macizo (Constantes de LAME λ y μ) y éstos a su vez dependen de su estado tensional, las determinaciones de los módulos se ven afectadas por dicho estado. A medida que se incrementa el estado tensional, también se incrementan los valores de los módulos elásticos estático y dinámico.

MEDICIONES DINAMICAS SOBRE TESTIGOS DE ROCA

En general en los estudios destinados al emplazamiento de obras civiles en macizos rocosos, se efectúan perforaciones con corona de diamante con el objeto de extraer testigos que indican el estado litológico del macizo. Estos testigos se emplean a posteriori para realizar una serie de ensayos, tanto estáticos como dinámicos.

Disponiendo convenientemente el testigo en el laboratorio, se lo puede excitar para que realice vibraciones longitudinales, transversales y/o torsionales, de manera tal de definir cuál es la frecuencia de resonancia en cada modo de vibración propia de cada probeta.

Para poder aplicar estos métodos, el testigo debe tener una longitud de varias veces el diámetro (como mínimo, la longitud debe ser el doble del diámetro).

Vibraciones longitudinales

La determinación de las propiedades elásticas de las rocas, por medio de la determinación de la frecuencia de resonancia para vibraciones longitudinales, es la más simple y en general se la emplea como elemento de contraste con los otros modos de vibración

Esta facilidad se ve reflejada en el comportamiento del equipo de registración, donde las observaciones en el osciloscopio son de mayor amplitud que para otros modos de vibración.

En las vibraciones longitudinales las partículas se mueven a partir de su posición de equilibrio en sentido paralelo al eje de la probeta de roca y se asume que la sección transversal de la misma permanece plana, o sea que el único movimiento es en el sentido axial.

Esta asunción se verifica siempre que la longitud de onda de excitación transversal, que pasa por el testigo sea lo suficientemente grande respecto de la sección transversal. En otras palabras, cuando el testigo vibre longitudinalmente, el desplazamiento transversal debe ser nulo.

En base a las condiciones anteriores, la relación matemática que vincula el módulo de elasticidad E con la frecuencia de resonancia es:

$$E = \frac{K \Gamma^2 \rho l^2}{n^2 g}$$

E = Módulo dinámico de Young

Γ = Frecuencia de resonancia

ρ = Densidad

l = Longitud del testigo

n = Nº de nodos de vibración

g = Aceleración de la gravedad

La ecuación anterior, en base a una serie de reemplazos, se puede escribir:

$$E = C W f^2$$

donde:

E = Módulo de Elasticidad

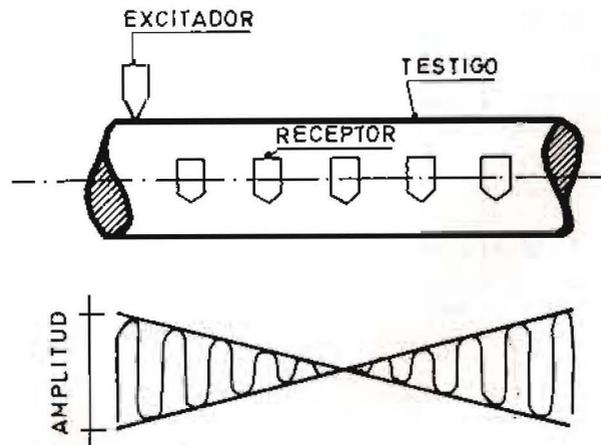
W = Peso del testigo

f = Frecuencia de resonancia

c = Constante que involucra la longitud, momento de inercia, aceleración de la gravedad, etc.

Esta ecuación ha sido adoptada por la ASTM (American Society for Testing of Material).

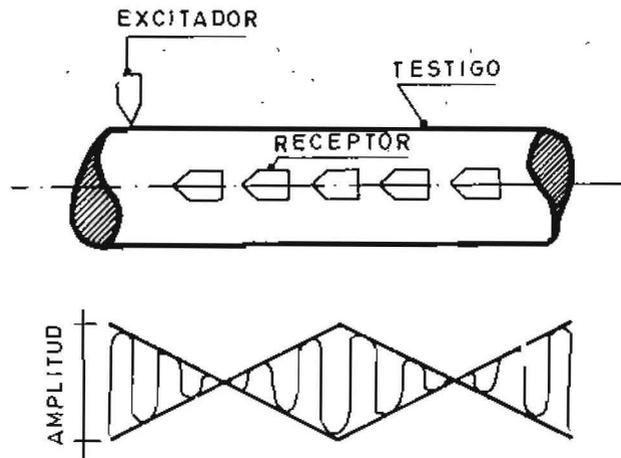
Para este modo de vibración es necesario ubicar los transductores de excitación y captación como indica la siguiente figura: el eje del transductor de captación está perpendicular al testigo.



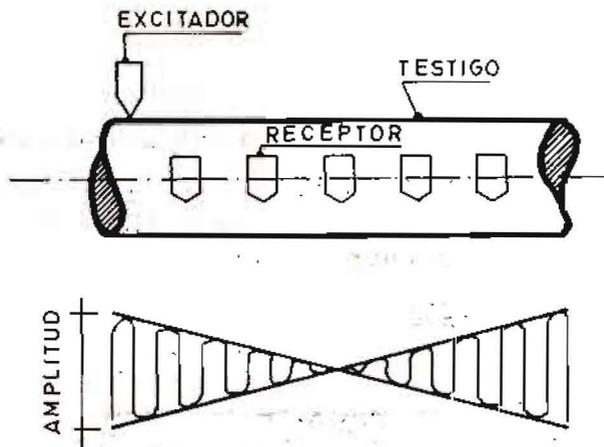
Se puede observar cómo se modifica la amplitud leída en el osciloscopio a medida que el transductor de captación se desplaza a lo largo del testigo. Para asegurarse que se está realmente en presencia de vibraciones longitudinales se coloca el eje del transductor de captación paralelo al eje del testigo, debe observarse que no hay señal en el osciloscopio.

Vibraciones Transversales de una barra cilíndrica

Para la determinación de la frecuencia de resonancia para el modo de vibración transversal, se ubica el testigo en la mesa de ensayos colocando adecuadamente las cuchillas de apoyo de manera tal que las mismas queden en los nodos de vibración (una distancia aproximada de 0,2 a 1 a ambos extremos de la barra) reajustando la posición de las mismas hasta asegurarse su correcta posición. En este caso, si el transductor de captación, una vez lograda la máxima salida en el osciloscopio, se desplaza con su eje paralelo al eje del testigo, se obtendrá un diagrama de amplitudes como el indicado en la siguiente figura:



En cambio, si el eje del transductor de captación se coloca perpendicular al eje del testigo, se obtiene el siguiente diagrama de amplitudes:



En este caso se trabaja bajo la premisa de que las deformaciones en el testigo son de dilatación y compresión a lo largo del eje del testigo y por lo tanto los movimientos son normales al eje del mismo. Youash (1964) ha trabajado sobre el problema matemático que liga la frecuencia de resonancia transversal con el Módulo de Elasticidad, llegando a una fórmula similar a la de vibraciones longitudinales:

$$E = K W f^2$$

donde:

E = Módulo de Elasticidad

W = Peso del testigo

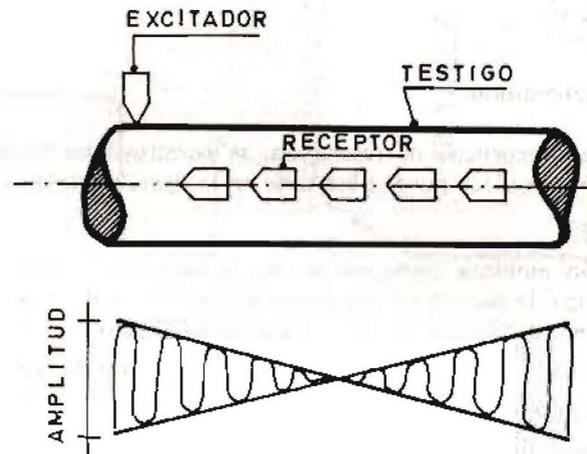
f = Frecuencia de resonancia transversal

K = Factor de Corrección que es función de:

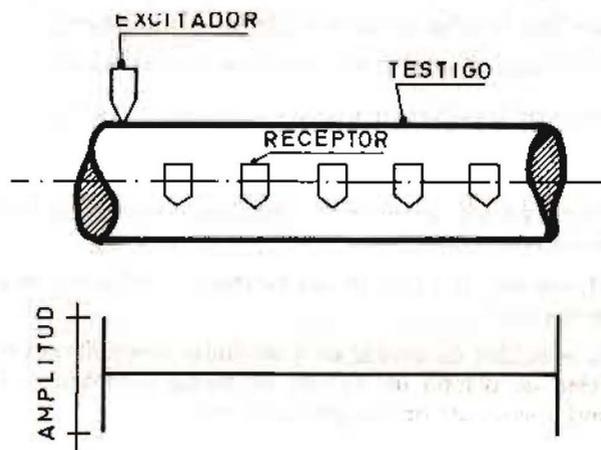
Coefficiente de poisson, longitud del testigo, diámetro del mismo

Vibraciones Torsionales de una barra cilíndrica

Se asume como en los casos anteriores que el testigo no tiene ningún tipo de restricción en sus extremos para que pueda vibrar libremente. Asimismo se colocan los transductores, tanto de excitación como de captación, según la siguiente figura, obteniéndose un diagrama de amplitudes, como el indicado:



Debida a la similitud de la forma de vibrar con el modo transversal, se requiere una posterior comprobación de la misma, para lo cual, el eje del transductor de captación de la señal se coloca perpendicular al eje del testigo, debiendo dar una indicación nula en el osciloscopio, cuando dicho transductor se desplaza a lo largo del testigo.



Para que se produzca lo mencionado, se trabaja con la asunción de que tanto el radio del testigo como la sección de la misma no cambian durante la vibración.

La expresión matemática que vincula el módulo de rigidez con la frecuencia de resonancia para el modo torsional, está dado por:

$$G = \frac{K f^2 L W R}{A n^2 g}$$

donde:

- G = Módulo de rigidez
- f = Frecuencia fundamental para vibración torsional
- L = Longitud del testigo
- W = Peso del testigo
- R = Relación entre el momento polar de inercia y factor de forma
- A = Área de la sección transversal
- g = Aceleración de la gravedad
- n = Nodos de vibración
- K = Constante de proporcionalidad

Esta última fórmula puede ser simplificada como en los casos anteriores, quedando reducida a:

$$G = B W f^2$$

donde:

$$B = \frac{K R L}{g A n^2}$$

Descripción del Equipo de Laboratorio

Para la determinación de las frecuencias de resonancia, se construyó un equipo para mediciones por el método sónico, cuyo diagrama en block puede observarse en la figura siguiente

Consta fundamentalmente de:

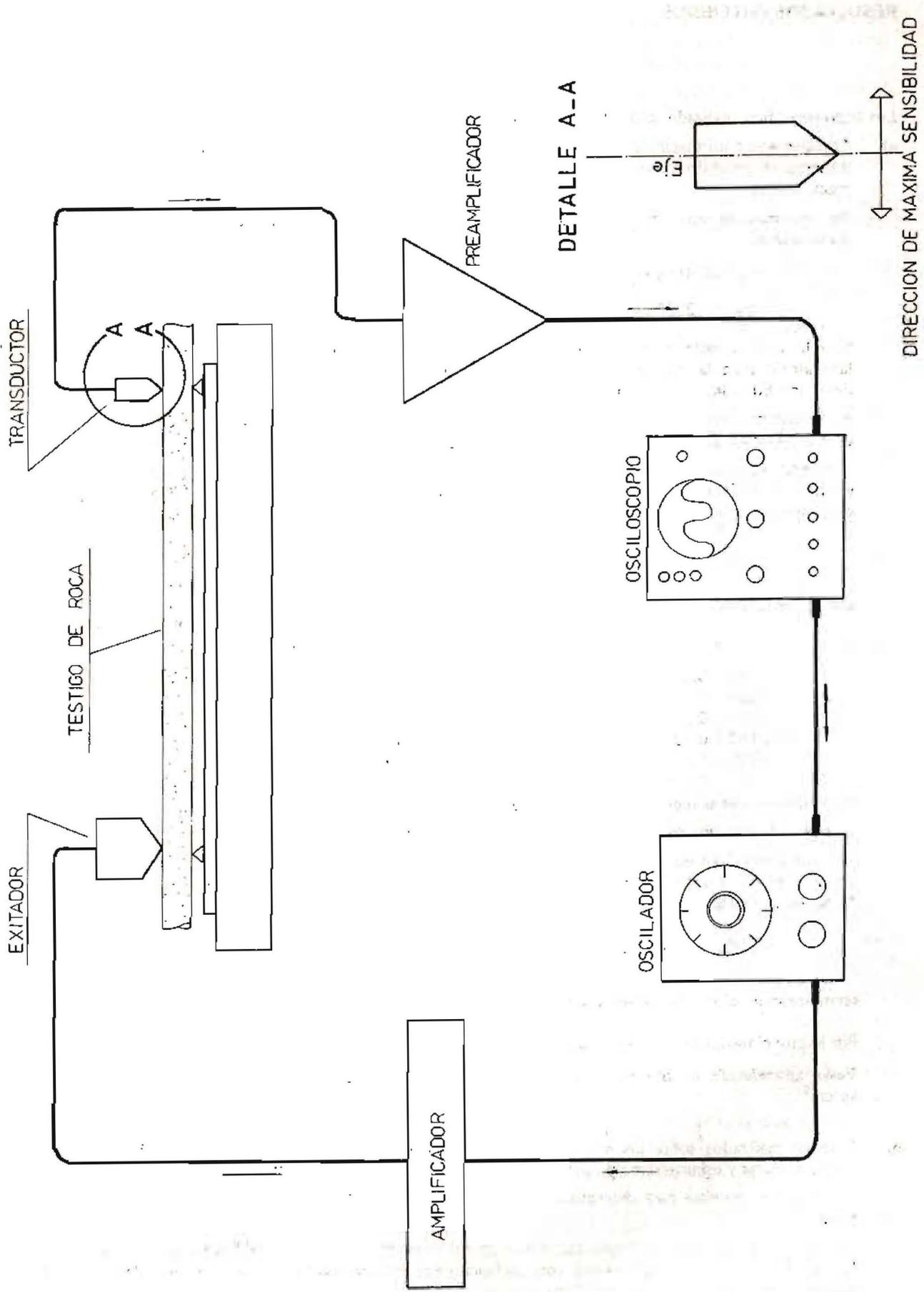
- a) Una mesa de hormigón montada sobre espuma de goma donde, mediante un par de cuchillos de goma, se coloca el testigo de manera tal que pueda vibrar libremente; la separación entre los cuchillos está en función del modo de vibración y de la longitud del testigo.
- b) Un oscilador de frecuencia variable con un rango de 5 c/seg a 100 Kc/seg.
- c) Un amplificador, cuya misión es proporcionar la potencia necesaria al transductor excitador.
- d) Un transductor excitador, que en nuestro caso fue un altoparlante modificado y con una respuesta en frecuencia conocida.
- e) Dos transductores para captar la señal proveniente del testigo; se utilizaron cápsulas de reluctancia variable con respuesta plana entre 20 c/seg y 15 Kc/seg dispuestas de manera tal que las mismas puedan desplazarse a lo largo del testigo.
- f) Preamplificadores para elevar la señal proveniente de los transductores.
- g) Un osciloscopio para comparar la señal de excitación con las señales de salida.

Los procedimientos de medición consisten en excitar el testigo a distintas frecuencias y observar en el osciloscopio la amplitud de salida de la señal, obtenida la máxima señal, determinar mediante las figuras de Lisajous, si la frecuencia de excitación y salida son idénticas.

Los testigos deben estar refrentados al torno en sus extremos y no deben tener impedimento alguno para que sus extremos vibren libremente.

Los testigos deben estar refrentados al torno en sus extremos y no deben tener impedimento alguno para que sus extremos vibren libremente.

Para la determinación de la velocidad de propagación de ondas longitudinales en los testigos, se empleó un equipo comercial de medición de tiempo de tránsito de pulsos ultrasónicos. Los transductores, tanto de excitación como de captación, fueron del tipo magnetostrictivos.



RESULTADOS OBTENIDOS:

Los trabajos se han realizado sobre distintos macizos rocosos y los resultados se detallan a continuación:

- a) Trabajos sobre un macizo de pórfiro riódacítico gris, de edad permotriácica. Es una roca porfírica que presenta en general un aspecto masivo con poca fracturación por lo cual se puede considerar como un macizo sano.

De los trabajos en campaña se obtienen velocidades de propagación de ondas longitudinales y transversales.

$$V_L = 4165 \text{ m/seg}$$

$$V_T = 2200 \text{ m/seg}$$

Con lo cual se determinó un coeficiente de Poisson de $\nu_d = 0,30$; la densidad media obtenida en laboratorio para la roca es de $\delta = 2,67 \text{ gr/cm}^3$. Lo que permitió calcular un módulo de elasticidad dinámico $E_d = 342.600 \text{ Kg/cm}^2$.

Se determinó en laboratorio por el método sónico el módulo de elasticidad dinámico sobre un total de 8 testigos arrojando un valor promedio de 380.000 kg/cm^2 .

Con estos valores se aplicó una fórmula propuesta por el Dr. H.MATSUDA que vincula el módulo de elasticidad dinámico determinado en laboratorio E_d' con el determinado in situ E_d para dar lo que se denomina capacidad de fundación

$$K = \frac{E_d' - E_d}{E_d'}$$

dando los valores de K se comparan con los de la siguiente tabla:

K	Cap. de Fundación de la roca
00 a 0,25	Muy buena
0,25 a 0,50	Buena
0,50 a 0,65	Suficiente
0,65 a 0,80	Insuficiente
0,80 a 1	Mala

para nuestro caso se reemplazaron los valores dando un $K = 0,1$

Lo que indicaría una roca de muy buena capacidad de fundación.

No se determinó en esta experiencia el módulo elástico por el método de pequeña sísmica pero se trata de determinar el valor probable del módulo elasticidad estático aplicando la fórmula propuesta por Kujunzic que relaciona ambos módulos, el estático y el dinámico.

$$\frac{E_d}{E_E} = 1,8 - \frac{E_d}{1100} \quad (\text{M Pa})$$

reemplazando valores se obtiene una relación de $\frac{E_d}{E_e} = 1,50$

Por lo que el módulo estático probable para el macizo es de 228.000 kg/cm^2

Valor aproximado al obtenido mediante ensayos estáticos que arrojaron un valor de $E = 210.000 \text{ kg/cm}^2$.

- b) Trabajos realizados sobre un macizo de rocas sedimentarias formado por cuarcitas claras y oscuras, areniscas claras y oscuras con alternancias de lutitas y en parte intruidas por rocas de origen ígneo.

Se realizaron pruebas para determinar los módulos de elasticidad dinámicos en los diversos tipos de rocas.

Los valores de módulo de elasticidad dinámico E_d obtenido varían entre 458.000 kg/cm^2 y 200.000 kg/cm^2 (en este último caso lutitas) con coeficientes de Poisson variables entre 0,17 para las cuarcitas oscuras hasta 0,30 en areniscas color claro.

Sobre los testigos obtenidos de las perforaciones se obtuvieron resultados muy variables en función del tipo de roca, la dispersión de los mismos es muy alta. La aplicación de la fórmula de MATSUDA arrojó valores entre 0,20 y 0,60 lo que daría capacidad de fundación entre muy buena y suficiente.

Se realizaron ensayos in situ para la determinación del módulo de elasticidad estático mediante el método de gran placa arrojando un valor medio para las cuarcitas de 295.000 kg/cm².

Como en el caso anterior se aplicó la fórmula de Kujuncic lo que arrojó un resultado de 2 módulos de elasticidad estáticos probables que varían entre 340.000 kg/cm² para cuarcitas oscuras hasta 130.000 kg/cm² para lutitas sanas.

- c) Ensayos realizados en Gneiss. Biotítico Granatífero. Roca masiva con espaciamiento de diaclasas poco frecuentes, de grano grueso.

En laboratorio se realizaron ensayos sobre 12 testigos que arrojaron un valor del módulo de elasticidad por el método sónico de 580.000 kg/cm² variando los valores entre 450.000 kg/cm² y 690.000 kg/cm².

Para ensayos realizados in situ se determinaron valores del coeficiente de Poisson $\nu_d = 0,16$ a $0,18$; el valor promedio obtenido para módulo de elasticidad dinámico. $E_d = 630.000$ kg/cm² llegando en algunas determinaciones hasta 950.000 kg/cm².

Estos valores superan a los valores medios obtenidos en los testigos, razón por la cual la roca del macizo es de muy buena calidad. Esta diferencia estaría relacionada con la descompresión sufrida por el testigo respecto al macizo.

En la aplicación del método de pequeña sísmica se determinó una frecuencia de las ondas transversales de 730 c/s que de acuerdo al gráfico dado por Schneider correspondería en $E_M = 280.000$ kg/cm².

Los valores obtenidos mediante ensayos in situ de placa grande arrojaron valores medios del módulo de elasticidad estático del orden de 400.000 kg/cm².

La aplicación de la fórmula propuesta por MATSUDA da un coeficiente de 0,08 lo que es indicativo de una roca con muy buena capacidad de fundación.

- d) Ensayos sobre calizas cambro ordovícicas de color gris, silicificadas y con betas de cuarcitas.

Se realizaron 5 determinaciones de módulo en testigos de roca mediante método sónico arrojando un valor promedio de $E_d = 700.000$ kg/cm².

En los ensayos dinámicos realizados in situ podemos distinguir dos estados, el primero que consistió en determinar las velocidades de propagación en forma paralela a la estratificación que arrojó resultados para el coeficiente de Poisson $\nu_d = 0,22$ y un valor medio de módulo de elasticidad dinámico $E_d = 620.000$ kg/cm². Para el caso de determinaciones superficiales y en sentido perpendicular a la estratificación los valores obtenidos para el módulo de elasticidad dinámico E_d variables entre 180.000 kg/cm² y 311.000 kg/cm². Estas notables variaciones entre el interior del macizo y la superficie estaría íntimamente vinculado a la fuerte descompresión superficial aunada a la estratificación.

La determinación del módulo de elasticidad estático se realiza mediante el método de placa grande y arroja un valor medio de 370.000 kg/cm² y la determinación por pequeña sísmica $E_M = 230.000$ kg/cm². Estas dos determinaciones se realizaron en una galería de ensayo en el interior del macizo.

La aplicación de la fórmula propuesta por MATSUDA es relativa pues arrojaría valores de $K = 0,18$ indicativa de rocas de muy buena calidad en el interior del macizo, mientras que los valores obtenidos para superficie $K = 0,76$ y $K = 0,60$ indicarían una capacidad de fundación desde aceptable a insuficiente.

- e) Ensayos efectuados en pórfiros riolíticos color rosado en un macizo con escaso diaclasamiento.

Se ensayaron 3 testigos en laboratorio obteniéndose un valor medio de módulo de elasticidad de 495.000 kg/cm² mientras que los valores obtenidos mediante ensayos sísmicos convencionales arrojaron un valor medio de 490.000 kg/cm².

La ejecución de 3 ensayos de placa, 2 de placa chica y uno de placa grande para la determinación del módulo de elasticidad estático arrojaron un valor medio de $E = 280.000$ kg/cm².

Mediante el método de pequeña sísmica los valores que se obtienen son de 420 c/seg para la frecuencia de la onda transversal la que da un valor $E_M = 175.000$ kg/cm².

La aplicación de la fórmula de MATSUDA da valores de $k = 0,1$ indica que la de roca es de muy buena calidad para fundación.

Conclusiones:

De los resultados obtenidos para los diversos tipos de roca de la región, podemos concluir que mediante aplicación de los valores obtenidos por el método de la pequeña sismica (Schneider) los valores obtenidos para los módulos de elasticidad son inferiores a los obtenidos mediante los ensayos estáticos in situ, en cambio una buena aproximación se logra aplicando la fórmula propuesta por Kujundzic o bien la ecuación resultante del gráfico obtenido por el Dr. Fernández Bollo.

En todos los casos debe tenerse presente que los ensayos estáticos son puntuales, mientras que los dinámicos abarcan grandes zonas del macizo bajo estudio.

BIBLIOGRAFIA

- BOLLO, Mariano F. Resultats des recherches geotechniques sur une serie de sites de barrages
Compte Rendus, 8 Congr. Int. des Grands Barrages, Vol. I. Edimburgh 1964
- COATES, D.F. Fundamentos de Mecánica de Rocas
Editorial Blume 1970
- FARMER, I.W. Engineering Properties of Rocks
Editorial E y F.N. Spon Ltd.
Londres 1968
- HABETHA, E. y LANGER, M. - Der Einflub des geologischen Aufbaus des Untergrundes auf Druckwellenausbreitung und Bauwerk serchuterungen
V.D.I. Berishte Nr. 13-5-89-93
Dusseldorf
- KOLSKY, H. Viscoelastic Waves International Simposium on Stress propagation in Material
1960
- KUJUNZIC, B. Correlation between static and Dinamics investigation on rock mass in situ
Elastics . property of DAM foundation Rock
Inter. Cong. of Larg DAM Edimburgh 1964
- ROUSELL, J.M. Etude Theorique et experimentale du module dynamique des Massifs rocheux
Revue de L'Industrie Minerale Agosto de 1968
- SCHNEIDER B. Moyen Nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux
Annales I.T.B.T.P. Julio y Agosto 1967.
- STAGG y ZIENKIEWICZ, O.C. - Rock Mechanics in engineering Practice
Ed. John Wiley 1968
- TIMOSHENKO, S. y YOUNG, D.H. - Vibration Problems in engineering
D. Van Nostrand Co. 1955
- YOUASH YOUNATHAN - Dinamic phisical properties of rock
The University of Texas 1964