

Elementos de escala en la evaluación dinámica de macizos rocosos (propuesta metodológica)

Scale Elements in Rocky Massifs' Dynamic Evaluation (A Methodology Proposal)

Álvaro Orlando Pedroza Rojas*
Mario Camilo Torres Suárez**

Resumen

Distintas situaciones conforman la realidad del ejercicio geotécnico, entre otras: la relativa superficialidad de la profundidad de emplazamiento de las obras civiles, un medio dinámicamente activo sometido a cargas igualmente dinámicas y el hecho frecuente de proyectar y diseñar las obras geotécnicas con base en respuestas geomecánicas de muestras de rocas definidas como representativas de los macizos rocosos de emplazamiento, con las dificultades que conlleva asignar al medio natural propiedades de resistencia y deformabilidad a partir de las pruebas en laboratorio sobre muestras representativas. El artículo presenta algunos lineamientos y elementos de escala sugeridos para ser considerados en los estudios de caracterización de macizos rocosos, con énfasis dinámico. A partir de los desarrollos de Brillouin (1946) y Torres (2005),

Abstract

Different situations make up the geotechnical exercise's reality, among others: The relative superficiality of the civil works construction's depth; a dynamically active area, subject to loads equally dynamic and to plan and to design geotechnical works' frequent activity, based on geo-mechanical responses of rock samples, defined as representative of the rocky massifs sites, with the difficulties involved in assigning to the natural environment the resistance and deformability properties, from laboratory tests on representative samples. Some guidelines and scale elements suggested to be considered in rock mass studies' characterization, with emphasis on dynamic, here are presented. Based on the Brillouin (1946) and Torres (2005) developments, the authors propose a methodological process aimed at establishing a scale factor, between

Ingeniero Civil, UFPS, M.Sc. Geotecnia, SDSMT – USA. Candidato a Dr. en Ingeniería–Geotecnia, UNAL, Colombia. Grupo de Investigación en Geotecnia –UNAL– Colombia. Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental –UFPS– Colombia. Correo: geoproa@gmail.com
Ingeniero Civil, UGC, M.Sc. Geotecnia, UNAL, Colombia. Candidato a doctor en Ingeniería–Geotecnia, UNAL, Colombia. Grupo de Investigación en Geotecnia –UNAL– Colombia. Correo: camilogeotecnia@gmail.com

los autores proponen un proceso metodológico orientado a establecer un factor de escala entre dos niveles de estudio: tamaño de muestra y macizo rocoso.

Palabras clave: Macizo rocoso, Propiedades dinámicas, Factores de escala.

two levels of study: the sample size and the rocky massif.

Key words: Rocky massif, Dynamic properties, Scale factors.

I. INTRODUCCIÓN

La dificultad de predecir con alto nivel de confiabilidad el comportamiento del medio térreo y de las estructuras emplazadas sobre él, sometidas a solicitaciones de carga reales a lo largo de la vida útil, constituye una problemática que amerita buscar elementos ingenieriles que acerquen los valores de los modelos de diseño a las condiciones de la situación real. Bajo esta premisa se plantea, para el caso de la geotecnia, la necesidad de desarrollar ejercicios racionales que permitan comparar los resultados de pruebas sobre especímenes de laboratorio (lo que es práctica frecuente en el diseño ingenieril) con los resultados de ensayos realizados *in situ* sobre el macizo rocoso fuente de las muestras de ensayo.

Quizá esta búsqueda de factores de reducción o mayoración entre las propiedades que se obtienen en una escala de estudio (especímenes de roca en laboratorio), para encontrar los valores apropiados en otra escala (macizo rocoso), de una determinada propiedad de los geomateriales, es la que da sentido a la definición de la mecánica de rocas como “ciencia teórica y práctica del comportamiento mecánico de las rocas y de los macizos rocosos” o como “rama de la mecánica referente a la respuesta de la roca y del macizo rocoso a los campos de fuerzas de su ambiente físico” [1].

Con base en lo anterior, es necesario continuar el esfuerzo, ya iniciado por diferentes investigadores en diversas latitudes, de dar soporte científico a las premisas que usualmente son exhibidas como fundamentos de la aplicabilidad de la Mecánica de Rocas a los desarrollos mineros, tal como la de aceptar expresamente que “a un macizo rocoso se le puede atribuir un sistema de propiedades mecánicas que pueden ser medidas en una prueba estándar o que pueden ser estimadas utilizando técnicas establecidas”. De hecho, es común en la Mecánica de Rocas registrar que las propiedades del macizo rocoso están gobernadas por las propiedades de la roca intacta, las discontinuidades, el estado de esfuerzos *in situ* y por el agua subterránea.

El factor de escala es uno de los temas esenciales que definen la complejidad de la geotecnia (en especial, de la Mecánica de Rocas, dado el carácter discreto de los macizos) y que reclama como necesidad prioritaria la investigación y el desarrollo de relaciones constitutivas y de procedimientos metodológicos, especialmente en su aplicabilidad. Al respecto, la literatura científica presenta desarrollos experimentales que destacan la forma como la respuesta de la roca a cargas impuestas (resistencia y propiedades de deformación) está asociada a un efecto fuerte en el tamaño o escala de la carga, debido en parte a la naturaleza litológica del material, la variación de los elementos estructurales y las características de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos; tal influencia ha sido apreciada mediante desarrollos experimentales con diferentes escalas de carga (referenciadas a las cargas a que se someten los macizos rocosos en trabajos ingenieriles o a las que le impone la naturaleza, como las fuerzas sísmicas).

Lo expuesto destaca la importancia de las especificaciones en la determinación de las propiedades mecánicas de los geomateriales *in situ*, máxime si se toma en cuenta la dificultad de realizar ensayos en muestras de rocas con juntas, a una escala suficientemente grande, para representar con un alto grado de confiabilidad la continuidad equivalente. Esta consideración argumenta la necesidad de proponer y validar métodos que permitan, en forma sólida, establecer las propiedades del macizo rocoso a partir de las obtenidas para sus elementos constitutivos, o de sintetizar las características del macizo para cada uno de sus elementos.

II. ANTECEDENTES

En la búsqueda de establecer las propiedades geomecánicas más confiables del macizo rocoso, se han ideado pruebas de campo y equipos para reproducir *in situ* ensayos que normalmente son hechos en laboratorio, y se ha procurado establecer correlaciones entre las respuestas de una y otra escala. En esta dirección, Anderson et ál. [2] adelantaron la construcción de un aparato para el ensayo triaxial a

escala real en el terreno con una muestra del tamaño de un pilar de soporte en ingeniería subterránea, procurando evaluar con ello la influencia de las discontinuidades a gran escala de un macizo rocoso.

En ese orden de ideas, el concepto de escala, referido al orden de magnitud del objeto estudiado, se yergue como el eslabón básico a ser abordado. El tema, sin ser nuevo, requiere aún de estudio y análisis. A manera de muestra se citan a continuación algunos referentes investigativos.

Nakamura et ál. [3] formulan un modelo de macizo rocoso fracturado utilizando muestras de roca intacta y sus características de resistividad, en un intento por evaluar cuantitativamente la influencia de la fracturación en las propiedades de resistividad y en las características físicas del macizo rocoso.

Sitharam et ál. [4] demostraron la utilidad y eficiencia del modelo práctico de equivalente continuo, propuesto para simular macizos rocosos fracturados, en la estimación de las propiedades del macizo rocoso fracturado a partir de las propiedades de la roca intacta y del factor de juntas (J_p), el cual integra las propiedades de las discontinuidades (frecuencia, orientación y resistencia) de estas.

Catrin [5] demuestra que el efecto de escala se presenta cuando se tienen especímenes de prueba con diferentes tamaños, los cuales arrojan distintos resultados.

Según Cunham [6], la heterogeneidad (expresada como presencia de diversos componentes mineralógicos con diferente comportamiento) en especímenes de roca intacta es el factor más importante en el efecto de escala; esto lleva a razonar que la alta concentración de ciertos minerales en una muestra, o la amplia diversidad de ellos, aumenta la heterogeneidad.

Para Bandis [7], el incremento en el tamaño de la muestra conduce a un incremento de la heterogeneidad y, por consiguiente, a un decremento de la resistencia a la compresión confinada de la roca con el aumento en el tamaño del espécimen.

Hoek y Brown [8] señalan que el factor de escala en discontinuidades se relaciona con el decremento de la resistencia pico al corte, en la medida que el tamaño de la muestra se incrementa. En el macizo rocoso, su comportamiento mecánico depende de las dimensiones del bloque formado por las familias de discontinuidades y fracturas aleatorias, y, naturalmente, de los respectivos valores de resistencia que ofrezca cada una de estas superficies. Así mismo, estos autores muestran la forma como la escala afecta la resistencia del macizo rocoso para un túnel de sección transversal constante en la dirección de las discontinuidades.

Motyn y Douglas [9] enfatizan que el comportamiento de un macizo rocoso blocoso a una escala de 10 m es ampliamente diferente a un macizo rocoso blocoso a una escala de 500 m.

Por otra parte, es relevante señalar que existen referentes de investigación, como Sitharam et ál. [10], que en la determinación de las propiedades dinámicas de los geomateriales (módulo cortante, capacidad de amortiguamiento, etc.) enfatizan en el uso simultáneo de diferentes ensayos (columna de resonancia, pulso ultrasónico, ensayo “piezoelectric bender element”, etc., sobre muestras de laboratorio) e instan al análisis comparativo de las respuestas encontradas en cada prueba.

Así mismo, pese a no ser muy prolífera la investigación orientada al análisis comparativo entre las propiedades de propagación de ondas en dos niveles de escala de longitud del objeto estudiado, se encuentran en la literatura algunos referentes, tales como Guadagno y Nunziata [11], quienes evaluaron el efecto de las fracturas en las velocidades sísmicas mediante un estudio comparativo de velocidades de ondas compresionales y cortantes, medidas en campo (downhole test) y en laboratorio (pulso ultrasónico) sobre muestras de roca intacta artificialmente fracturadas de rocas caliza, encontrando correspondencia entre la fracturación visible de la roca y la velocidad de las ondas sísmicas compresionales, medidas superficialmente, y estableciendo que las velocidades obtenidas en la prueba downhole aumentaron con la profundidad y

fueron menores que las correspondientes velocidades ultrasónicas sobre núcleos de material.

Torres S. [12] establece importantes correlaciones entre algunas propiedades geotécnicas de los materiales térreos con velocidades de ondas compresionales estimadas con la técnica de pulso ultrasónico y asoma una primera aproximación (que se desarrolla ampliamente en el numeral 3 de este artículo) a la determinación de factores de escala entre las propiedades obtenidas a nivel de laboratorio respecto de las propiedades establecidas en el macizo rocoso *in situ*. Algunas de tales correlaciones se presentan igualmente en [22].

Por su parte, Pedroza et ál. [13] establecen un parangón entre las propiedades elásticas de un geomaterial sedimentario (arenisca cretácica, de la Formación Planeers, del Grupo Guadalupe, que aflora en el cinturón montañoso que bordea la Sabana de Bogotá-Colombia), obtenidas a partir de velocidades de onda compresionales medidas *in situ* con la técnica de refracción sísmica, y las obtenidas con base en los valores de velocidad ultrasónica longitudinal medida sobre muestras de material procedentes del macizo rocoso sobre el cual se practicó la técnica sísmica.

Sin embargo, como es apreciable en esta sucinta relación de antecedentes, pese a existir en la temática importantes desarrollos investigativos conducentes a correlacionar las propiedades estáticas del medio rocoso en su ambiente natural con las propiedades estáticas de la roca intacta, es difícil encontrar en la literatura científica trabajos que establezcan, en forma simultánea, relaciones entre las respuestas dinámicas de dos o más niveles dimensionales del objeto investigado, a partir de la evaluación sistémica de la propagación de ondas en cada una de las escalas, y es muy escasa, o nula, la divulgación de referentes documentales científicos que muestren el desarrollo procedimental para establecer los factores de reducción o de mayoración entre las propiedades del material obtenidas en las diferentes escalas de estudio.

El enfoque y el aporte esencial de este trabajo es el de proponer una metodología para determinar el

factor de escala dimensional entre propiedades de los geomateriales, a partir de la respuesta obtenida con métodos no destructivos, como las técnicas sísmicas (refracción, reflexión, downhole, crosshole, etc.) en las escalas del macizo rocoso *in situ*, y de medida de pulso ultrasónico en especímenes en laboratorio. Adicionalmente, y en virtud de las ventajas (máxima cobertura, mínimos costos, gran versatilidad de las pruebas, tiempos reducidos en ensayos, etc.) que tienen las pruebas indicadas, el artículo destaca la importancia de las mediciones del comportamiento dinámico de los geomateriales en la solución de problemas de ingeniería.

III. PROPUESTA METODOLÓGICA

Se presenta a continuación, en forma detallada, una propuesta metodológica para determinar un Factor de Reducción de Propiedades Mecánicas (resistencia y deformabilidad), aplicable a dos escalas diferentes de un medio natural, a saber: un macizo rocoso y los respectivos especímenes de roca de allí extraídos.

Uno de los factores que más incertidumbre representa a la hora de asignarle propiedades al macizo rocoso a partir de mediciones realizadas sobre pequeñas muestras de roca en el laboratorio es, justamente, la incidencia de la escala en que se encuentran estas dos presentaciones de un mismo medio, debido a que la muestra de roca se considera “intacta” y, en consecuencia, las propiedades de resistencia y deformabilidad medidas sobre ella darán valores más altos que los esperados para el macizo rocoso, que está controlado por discontinuidades de variada naturaleza, las cuales le otorgan un carácter discreto y diferente al de los especímenes.

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos con fines ingenieriles han intentado solucionar esta problemática de la mecánica de rocas, y a partir de mediciones sistemáticas en las dos escalas del medio han propuesto correlaciones empíricas para determinar un factor de reducción de propiedades. No obstante lo expresado, esas correlaciones aplican a los macizos rocosos sobre los que se realizaron ensayos de resistencia y deformabilidad, mediante procedimientos complejos que por lo general se

llevaron a cabo exclusivamente con fines investigativos, no prácticos.

La propuesta que se presenta en este artículo se fundamenta en la medición sistemática de propiedades y características de las dos presentaciones del mismo medio particulado, como son: a) las velocidades de ondas acústicas, b) el espaciado entre discontinuidades en el macizo rocoso y c) el tamaño medio de partícula en la muestra de roca. Se describe la secuencia metodológica con el propósito de que pueda ser implementada y se comprueben sus bondades, con miras a una aplicación sistemática en trabajos de ingeniería de rocas [14]. La validación de esta propuesta se ha realizado en varias oportunidades y ha arrojado resultados halagadores, demostrando su simpleza y coherencia en la asignación de propiedades esfuerzo-deformación para el macizo rocoso a partir de su determinación previa sobre los especímenes de roca.

A. Principios fundamentales

La metodología surge del principio propuesto por Brillouin [15], el cual establece que para un medio inherentemente periódico existe una relación unívoca entre la longitud de onda del tren de pulsos que lo atraviesa λ y la escala espacial interna de ese medio particulado (a). La longitud de onda se refiere a la escala espacial de una señal ondulatoria, de manera similar a como el periodo de ella (T) se refiere a su escala temporal, para un proceso tiempo-dependiente dado. La relación entre estas dos escalas (espacial versus temporal) es lo que se conoce como velocidad fase del medio ($V_f = \lambda / T$).

De manera análoga a como se relacionan el periodo predominante del tren de pulsos (T , tiempo de un ciclo, en segundos) y la frecuencia (f , número de ciclos en la unidad de tiempo, en *Hertz*), la cual a su vez se puede presentar como frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$), se relacionan la longitud de onda (espacio físico recorrido

en un ciclo completo de la onda) con el número angular de onda k , que es su inverso multiplicado por 2π , entonces se tiene que ($V_f = \omega / k$).

De otra parte, como se menciona en [16], la escala espacial interna del medio hace referencia a su dimensión característica, en caso de que esta se pueda determinar (dimensión fractal). Esta escala está asociada al tamaño o dimensión que más se “repita” (moda es el término estadístico) dentro del medio. Para determinarla se deben consultar las características físicas del medio y la escala dimensional en la que se realicen las mediciones, esto es, en la mega, macro o micro escala, según lo han propuesto algunos autores en ingeniería de rocas [17]. Las denominaciones para estas escalas pueden variar, pero en general se refieren al macizo rocoso, a la muestra de roca y a la microtextura que exhiben los geomateriales, respectivamente.

B. Desarrollo metodológico

1) Características ondulatorias de las señales

Para determinar la longitud de onda característica del tren de pulsos λ que atraviesa un medio después de una excitación (independientemente de la energía que la genere), se debe encontrar la relación existente entre la velocidad fase del medio (relación entre las escalas espacial y temporal, V_f) y el periodo predominante del tren de pulsos (T) de la señal en consideración.

Al procesar una señal digital registrada en el dominio del tiempo y transformarla al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Discreta de Fourier, como se describe ampliamente en [18], es simple determinar la frecuencia fundamental de ese registro (sismograma en campo u oscilograma en laboratorio (ver figura 1). El periodo fundamental es el inverso de la frecuencia fundamental y, en consecuencia, se toma como la escala temporal de ese registro (medio).

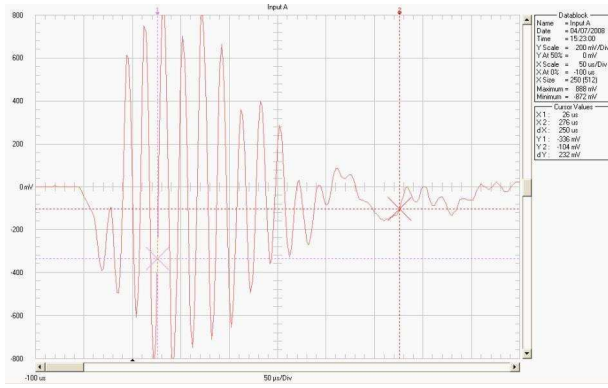


Figura 1. Oscilograma de laboratorio para una muestra de roca lodosa de la Cordillera Oriental y su espectro de frecuencias, obtenido mediante el osciloscopio Fluke® de la Universidad Nacional, Bogotá (2008) en [19]

La velocidad fase no necesariamente es la misma velocidad de onda del medio; por lo general, la primera es ligeramente menor, según se menciona en [16]. De todas formas, una primera aproximación consiste en asumir la velocidad de onda del medio como su velocidad fase y a partir de esta asunción despejar la longitud de onda, de acuerdo con (1).

$$= V_x T \quad (1)$$

La longitud de onda también se puede determinar mediante mediciones simples de la velocidad de onda y su relación con la frecuencia natural de resonancia del transductor emisor de la señal acústica, según (2). Los resultados de las ecuaciones (1) y (2) son sensiblemente diferentes, por lo que se deberá ser consistente en los cálculos subsiguientes respecto de utilizar el periodo fundamental del registro (T) o la frecuencia natural resonante del equipo (f_{res}).

$$res = V / f_{res} \quad (2)$$

2) Características dimensionales del medio

Para determinar la escala espacial interna del medio (a) se sugieren los siguientes procedimientos en función de su presentación (mega o macro escala), a saber:

a) En muestras de roca en laboratorio

Realizar granulometrías (mínimo tres ensayos de

gradación por tamizado o técnicas sedimentométricas, según se trate de materiales predominantemente grueso-granulares o fino-granulares) con el propósito de determinar la curva de distribución granulométrica representativa del material, pasándola de distribución acumulada a distribución normal. A partir de esta distribución se determina el “porcentaje que pasa característico”, y nuevamente sobre la curva de distribución acumulada se encuentra el tamaño característico o escala espacial interna (a).

b) En el macizo rocoso

Determinar la escala espacial mediante un análisis estadístico de los datos de separación entre las discontinuidades que predominen en el macizo, independientemente de su naturaleza. Allí se pueden utilizar medidas de tendencia central, como la moda o la media, considerando que la primera, por lo general, se ajusta en mejor forma al valor característico de la escala espacial interna del macizo rocoso (a_m), tal como se sugiere en [12].

C. Aplicación del principio fundamental

De esta manera, y aplicando el principio propuesto por Brillouin [15], se establece una relación de escala para cada presentación del medio según (3) y (3.a) y (3.b), presentadas en [12].

$$\text{Factor de escala según Brillouin} = fe = /a \quad (3)$$

$$\text{Factor de escala en macizo rocoso} = fe_m = \frac{m}{a_m} \quad (3.a)$$

$$\text{Factor de escala en laboratorio} = fe_l = \frac{m}{a_l} \quad (3.b)$$

D. Ejemplo de aplicación

A manera de ejemplo se presentan a continuación los resultados de un estudio reciente en el que se describe la secuencia completa de cálculos y aproximaciones por realizar, con el propósito de que se identifiquen con claridad los pasos por seguir para determinar el factor de reducción.

Se requiere determinar el factor de reducción de propiedades mecánicas entre un macizo rocoso y los respectivos especímenes de roca en laboratorio, pertenecientes a un afloramiento de la Formación Trincheras (KTr), Grupo Villeta, localizado en la cuenca de la quebrada La Negra, en inmediaciones del municipio de Útica, Cundinamarca. Información

detallada del material y de sus condiciones en campo, así como de los ensayos de caracterización y resistencia mecánica adelantados en el laboratorio se describe en la referencia [19].

1) Desarrollo de la secuencia metodológica

Primer paso: determinar la longitud de onda correspondiente al macizo rocoso (λ_m). La velocidad media de ondas compresionales se obtiene del registro de campo para el tramo de estudio, teniendo cuidado de separar los materiales por litología o en función de contrastes claramente identificados según los registros de estas velocidades de ondas (V_p), variando con la profundidad –utilizar las ecuaciones de correlación, en la medida de las posibilidades–, analizados preferiblemente en un gráfico semilogarítmico, con el propósito de evidenciar cambios importantes en las tendencias de las mediciones realizadas (figura 2).

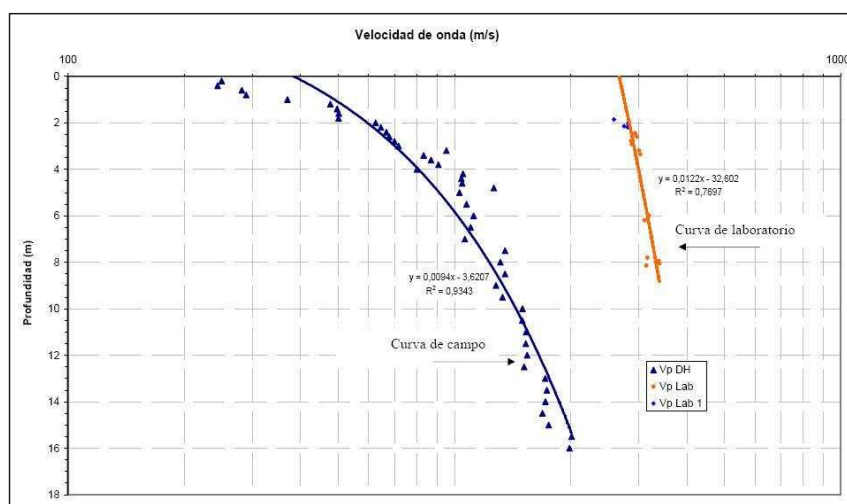


Figura 2. Variación de las velocidades de ondas, V_p , con la profundidad, para campo y laboratorio, respectivamente

$$\overline{V_{p \text{ campo}}} (m \cdot s^{-1}) = \frac{\bar{z} (m) + 3,6207}{0,0094} = \frac{16,5 \text{ m} / 2 + 3,6207}{0,0094} = 1263 \text{ m} \cdot s^{-1} \quad 1300 \text{ m} \cdot s^{-1}$$

Considerando que las mediciones en campo se obtuvieron mediante ensayos tipo down-hole, y que la frecuencia nominal del sismógrafo utilizado es cercana a los 10 Hz, se obtiene (λ):

$$\lambda = \frac{V_{p \text{ campo}}}{f_{\text{campo}}} = \frac{1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{10 \cdot \text{s}^{-1}} = 130 \text{ m}$$

Este valor es consistente con algunos de los espesores reportados en el levantamiento geológico para afloramientos cercanos y es múltiplo del espesor estimado para el sitio específico, que es de aproximadamente 600 m. Esta es una característica común cuando se determinan las longitudes de onda correspondientes a la medición de velocidades de ondas en los macizos rocosos [12].

Segundo paso: determinar la longitud de onda correspondiente a los especímenes de roca en laboratorio (λ_l), independientemente de su forma geométrica. Para el ejemplo se obtiene ($V_{p \text{ lab}}$):

$$V_{p \text{ lab}} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\bar{z} (m) + 32,602}{0.0122} = \frac{8,0 \text{ m} / 2 + 32,602}{0.0122} = 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La frecuencia resonante de la unidad de pulsos ultrasónicos (PUNDIT) que se utilizó para realizar los ensayos en laboratorio es de 54 kHz, entonces, para este caso se tiene que la (λ_l) es:

$$\lambda_l = \frac{V_{p \text{ lab}}}{f_{\text{res lab}}} = \frac{3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{54000 \cdot \text{s}^{-1}} = 0,056 \text{ m} \quad 5,6 \text{ cm}$$

Este valor se relaciona con las dimensiones generales de las probetas de laboratorio (alturas variables entre 5 y 9 cm, con media de 8.4 cm y desviación estándar de 1.9 cm; la altura media, menos 1.5 veces la desviación estándar, es igual a 5.55 cm y se asimila a_l , lo que se constituye en una característica común cuando se realizan estas mediciones en laboratorio [12].

Tercer paso: determinar las escalas espaciales internas correspondientes tanto al macizo rocoso en campo (a_m) como a los especímenes de roca en laboratorio (a_l), así:

(a) a_m se relaciona con el espaciamiento medio de las discontinuidades. En este caso el informe geológico reporta espaciamientos de juntos (6 a 20 cm) a moderadamente juntos (20 a 60 cm), sin establecer cuál de los rangos predomina. De acuerdo con observaciones adelantadas en campo, se establece que la media está entre 0,06 y 0,20 m, entonces a_m se calcula así:

$$a_m = \frac{(0.06 + 0.20) \text{ m}}{2} = 0.13 \text{ m}$$

(b) a_l se relaciona con el tamaño medio de grano o partícula que predomine en los especímenes y, en consecuencia, se obtiene de las granulometrías realizadas sobre estos materiales (figura 3).

En la figura 4 se presentan los valores medios de tamaños de agregados para cada una de las series realizadas. Se toman los valores más bajos porque se asimilan al tamaño medio de partícula resultante del proceso de fracturamiento mecánico sobre la muestra de roca “intacta”.

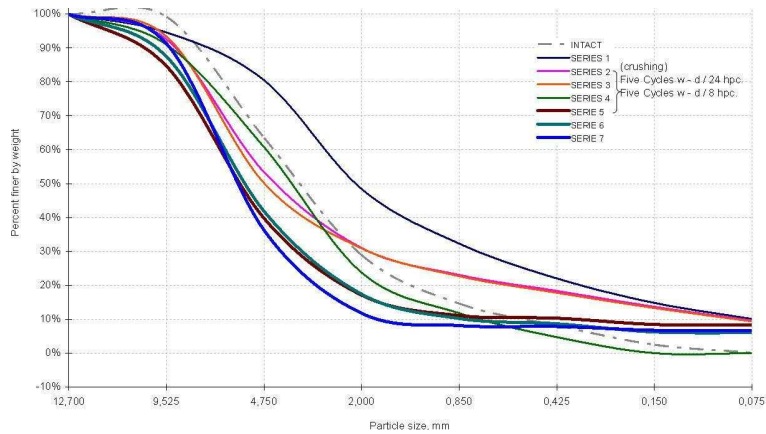


Figura 3. Curvas de distribución granulométrica para siete series de material rocoso degradado y una “intacta”

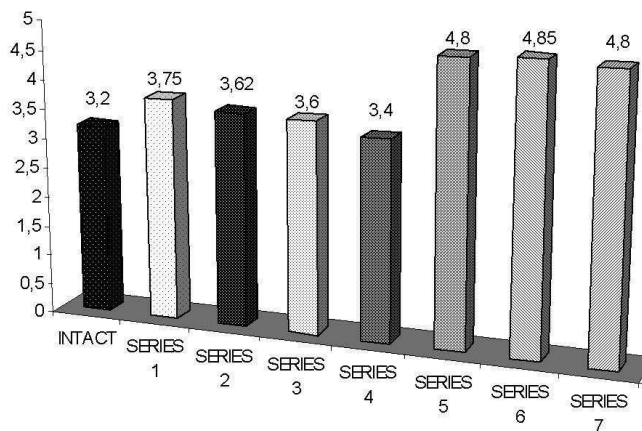


Figura 4. Valores medios de partícula al pasar las curvas granulométricas acumuladas a distribución normal

$$a_l = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{d}_i}{n} = \frac{(3,20+3,75+3,62+3,60+3,40) \text{ mm}}{5} = 3,514 \text{ mm} \quad 0,0035 \text{ m}$$

En donde \bar{d}_i se refiere al valor medio de tamaño de partícula para cada una de las distribuciones granulométricas, pasando dichas distribuciones de

su forma acumulada a su forma de distribución normal, y n es el número de gradaciones. Se cumple además la relación ($\bar{d}_i/a_l > 15$).

Cuarto paso: determinar los factores de escala para cada presentación del medio rocoso, así:

$$fe_m = \frac{m}{a_m} = \frac{130 \text{ m}}{0,13 \text{ m}} = 1000$$

(factor de escala para el macizo rocoso)

$$fe_l = \frac{l}{a_l} = \frac{0,0560 \text{ m}}{0,0035 \text{ m}} = 16$$

(factor de escala para la muestra de roca en laboratorio)

Quinto paso: determinar el factor de escala laboratorio:macizo según (4), propuesta por primera vez en la literatura científica por Torres (2005), en [12], así:

$$fe_{(l/m)} = \frac{fe_l}{fe_m} = \frac{16}{1000} = 0,016$$

Un factor de escala de esta naturaleza significa que las dos presentaciones del mismo medio rocoso están en una relación de 1:62,5. El factor de reducción sería su valor complementario.

Sexto paso: determinar el factor de reducción de propiedades mecánicas, el cual se obtiene a partir de (5), expresión igualmente propuesta por Torres (2005) e incluida en [12], así:

$$fr_{(m/l)} = \left[1 - \frac{1}{100 \cdot fe_{(l/m)}} \right] = \left[1 - \frac{1}{100 \cdot 0,016} \right] = 0,38 = 38\%$$

Antes de contrastar esta metodología con las mediciones realizadas tanto en campo como en laboratorio, se presenta a continuación un análisis de la ecuación (5), incluido en [12].

Este factor de reducción de propiedades, $fr_{(m/l)}$, integra las características predominantes en ambas escalas de un mismo medio particulado. El factor tiende a 1.0, es decir, iguales propiedades mecánicas entre los especímenes de roca en laboratorio y el macizo rocoso, para valores de $fe_{(l/m)}$ mayores que 0.1 (1:10), lo cual a su vez se presenta cuando: fe_l tiende a valores altos (si $l \gg a_l$, o a_l muy pequeña, por ejemplo en rocas cristalinas de grano muy fino) o fe_m tiende a valores bajos. (si m es muy pequeña, que implica f altas, perdiéndose resolución, o a_m es muy grande, por ejemplo en un macizo rocoso muy sano o un masivo rocoso); tiende a 0.0 para valores de $fe_{(l/m)}$ menores que 0.02 (1:50), lo que a su vez se presenta cuando: fe_l tiende a valores bajos. (si $l \approx a_l$ o $l/a_l \approx 2.0$, en cuyo caso no hay propagación de ondas según Brillouini, o $a_l \approx a_m$) o fe_m tiende a valores altos (implica f muy bajas, que los sismógrafos por lo común no registran, o a_m es muy pequeña, es decir, se trata prácticamente de un suelo).

2) Validación de la metodología

Para ello se presenta la figura 5, en donde se observa la variación del módulo de deformación elástico (E_0), determinado tanto en campo sobre el macizo rocoso como sobre muestras de roca en laboratorio, mediante procedimientos convencionales establecidos por la mecánica de rocas.

En el macizo rocoso dicho módulo se determina a partir de las ecuaciones de la elástica que relacionan el módulo de deformación elástico con las velocidades de onda, obtenidas en este caso particular mediante las técnicas down-hole y cross-hole. En el laboratorio se determinan los módulos de deformación mediante la medición de deformaciones unitarias con strain-gauges adheridos a las muestras, determinándolos a su vez como la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo-deformación al 50% del esfuerzo máximo en la falla (confinada o inconfiada).

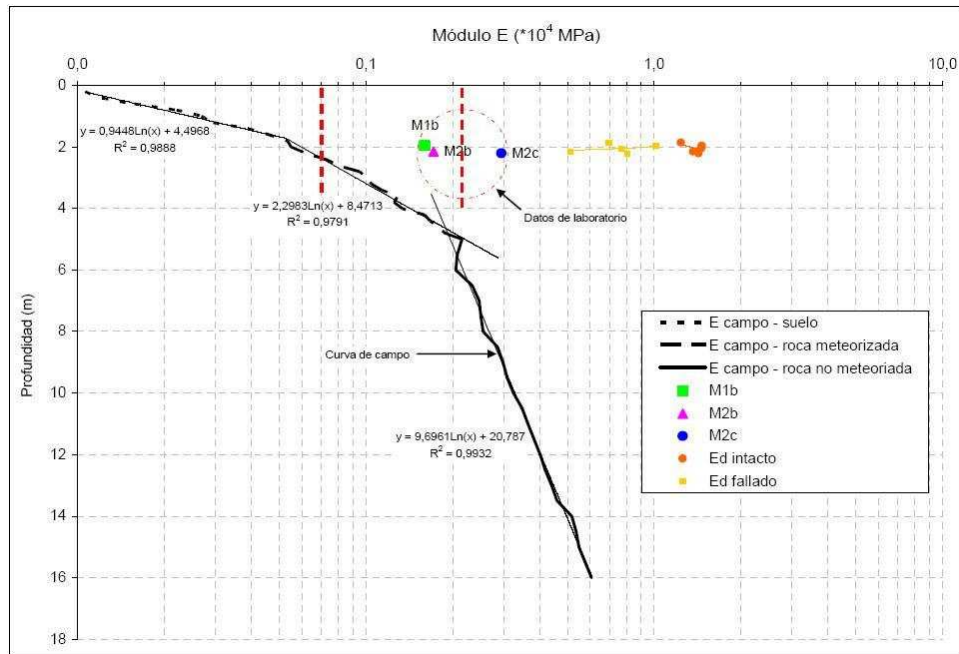


Figura 5. Variación del módulo de deformación (E_0), en campo y en laboratorio (Q. La Negra – Útica)

Como se observa en la figura 5, el valor representativo del módulo de deformación en campo para el tramo intermedio es el que corresponde a la profundidad aproximada de la que se obtuvieron las muestras para los ensayos de laboratorio (2,50 m). De acuerdo con la ecuación de la línea de tendencia para este tramo del registro en campo, el módulo es $0,074 \cdot 10^4$ MPa.

De otra parte, el valor medio del módulo de deformación elástico para los especímenes de roca, determinado en el laboratorio, es de $0,209 \cdot 10^4$ MPa. En consecuencia, el factor de reducción de propiedades aplicable a esta propiedad de deformabilidad del macizo se obtiene a partir de (6).

$$fr_{(m/l)}^{E_0} = \frac{\overline{E_0^m}}{E_0^l} \times 100\% = \frac{0,074 \cdot 10^4 \text{ MPa}}{0,209 \cdot 10^4 \text{ MPa}} \times 100\% = 36\%$$

Los resultados de esta metodología son contundentes y refuerzan los obtenidos en una investigación anterior sobre otro macizo rocoso, presentada en [20]. En dicha investigación se determinó que el factor de reducción de propiedades mecánicas estaba alrededor del 65%; la comparación de valores del módulo de deformación obtenidos sobre muestras de roca en laboratorio y el macizo, estaban en una relación de 1:38, correspondiente con un factor de reducción de propiedades del 62% para el módulo estático y del 60% para el módulo dinámico.

Para ese ejercicio, comparando los módulos de deformación estimados mediante la aplicación de los sistemas tradicionales de clasificación de macizos rocosos, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 1, algunos de los cuales se ajusten bien a dicho factor. Igualmente se presentan los resultados comparativos obtenidos para el ejercicio que se describe en este artículo.

Tabla 1. Factores de reducción de propiedades según los sistemas de clasificación de macizos rocosos.

Sistema \ Ejercicio	En [20] ($E_o^l = 3,08 \cdot 10^4$ MPa)		Este artículo ($E_o^l = 0,21 \cdot 10^4$ MPa)	
	Módulo E_o^m (* 10^4 MPa)	$f_r^{(m/l)}$	Módulo E_o^m (* 10^4 MPa)	$f_r^{(m/l)}$
GSI ⁽¹⁾	0.61	20%	0.27	120%
Q System ⁽²⁾	1.96	64%	0.50	N.A.
RMR ⁽³⁾	1.78	58%	1.00	N.A.

Según: ⁽¹⁾ Hoek (1995), Hoek y Brown (2002); ⁽²⁾ Barton et ál.; ⁽³⁾ Bieniawsky (1978) o Serafim y Pereira (1983).

Para el caso descrito en este artículo, y por tratarse de rocas blandas a muy blandas (rocas lodosas de los Andes colombianos), la mayoría de las correlaciones empíricas propuestas por los autores de los sistemas tradicionales de clasificación de macizos rocosos no aplican, debido a que dan valores demasiado altos y superiores a los módulos obtenidos en laboratorio, lo cual no es lógico.

Con respecto a la resistencia a la compresión confinada del macizo rocoso (σ_c^m) la metodología aquí propuesta predice el valor sugerido por (7) a partir de lo determinado en laboratorio en [19].

$$\sigma_c^m = f_r^{(m/l)} * \sigma_c^l = 0,38 * 7,3 \text{ MPa} = 2,8 \text{ MPa} \quad (7)$$

De acuerdo con el sistema de clasificación de macizos GSI, la resistencia a la compresión del macizo rocoso se estima en 3,0 MPa a partir de expresiones empíricas que se incorporan a una modelación numérica con ayuda del *software* RocLab[®] de Rocscience[®] [21].

IV. CONCLUSIONES

Se sugiere una metodología que, aplicada sistemáticamente, permite establecer un factor de reducción de propiedades mecánicas entre el macizo rocoso y los especímenes de roca en el laboratorio. Por lo general, determinar la resistencia a la compresión y el módulo de deformación del macizo son tareas complejas y costosas, que además introducen una gran incertidumbre asociada a los

pequeños volúmenes de material involucrados en tales determinaciones [22].

La metodología propuesta en este artículo se basa en la determinación previa de factores de escala para cada una de las presentaciones del mismo medio rocoso, mediante la identificación de dos parámetros inherentes al material y que a su vez son función de la técnica utilizada para efectuar las mediciones de velocidades de ondas, inicialmente de tipo compresional (V_p).

Los parámetros por determinar son la longitud de onda característica del tren de pulsos (λ), la cual es, a su vez, función de la velocidad de onda media; la frecuencia fundamental de resonancia del equipo utilizado en las mediciones (f_{res}), y la escala espacial interna característica (a) del medio particulado, relacionada con las discontinuidades en el macizo rocoso o el tamaño medio de agregado, en el caso de las muestras de roca en el laboratorio. La metodología aquí propuesta se presenta en forma esquemática y secuencial en la figura 6.

Finalmente, se determinó que es factible encontrar algunas correlaciones entre el factor de reducción de propiedades mecánicas establecido mediante esta metodología y expresiones propuestas en los sistemas de clasificación de macizos rocosos, las cuales tienen poca aplicación cuando se trata de macizos de roca blanda o de baja calidad, debido a que arrojan valores demasiado altos, comparándolos con los que se determinan sobre muestras de roca en laboratorio.

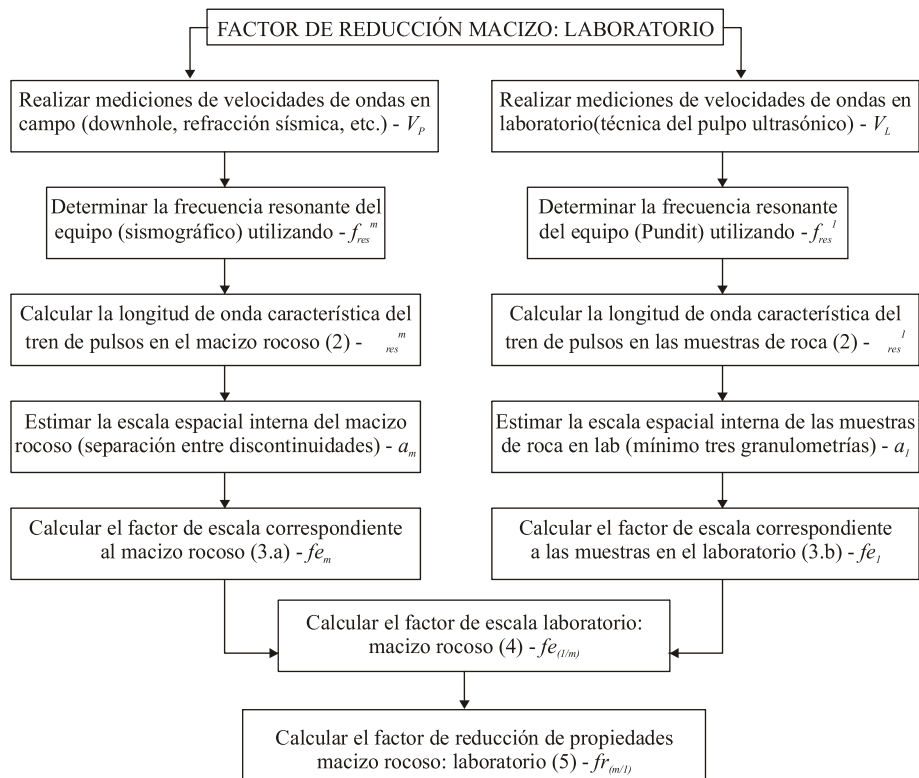


Figura 6. Flujograma para determinar el factor de reducción de propiedades esfuerzo-deformación y resistencia según la metodología propuesta en este artículo. Entre paréntesis (#) las ecuaciones por utilizar. Torres [22]

Referencias

- [1] US National Committee on Rock Mechanics, 1964-1974.
- [2] J. C. Anderson, C. D. Martin and R. Christiansson. "SKB's Äspö Pillar Stability", 2004.
- [3] Nakamura Makoto y Kusumi Harushige. "Preparation of Jointed Rock Mass Using Intact Rock Specimen and its Characteristics of Resistivity". *Journal of the Society of Materials Science*, Japan, Vol. 52; No. 5; p. 478-482, 2003.
- [4] T. G. Sitharam and V. B. Maji, "Equivalent Continuum Analyses of Jointed Rockmass". ARMA, American Rock Mechanics Association IUSRMS 05-776, 2005.
- [5] Catrin E. "Evaluation of Rock Mass Strength Criteria". Licentiate Thesis. University of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Rock Mechanics; 95 pages. November, 2004.
- [6] A. P. Cunham, "Scale Effects in Rock Mechanics. Proceedings of the First International Workshop on Scale Effect in Rock Masses". Loen, 7-8 June, 3-31, 1990.
- [7] S. C. Bandis, "Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength and Deformation of Rock Joints". PhD. Thesis. University of Leeds, 1980.
- [8] E. Hoek y E. T. Brown, "Underground Excavation in Rock". London: Instituto de Minería y Metalurgia, 1980.

- [9] G. Motyn y K. J. Douglas, "The Shear Strength of Intact Rock and Rock Masses". *GeoEng*. 2000. An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. 19-24 November, 2000. Melbourne, Australia, 1 1398-1421. ISBN 1-58716-067-6.
- [10] T. G. Sitharam, L. GovindaRaju y A. Sridharan. "Dynamic Properties and Liquefaction Potential of Soils". Department of Civil Engineering. Indian Institute of Science. Bangalore 560012, India, *Current Science*, Vol. 87, No. 10, 25 November, 2004.
- [11] F. M. Guadagno, C. Nunziata. "Seismic Velocities of Fractured Carbonate Rocks (Southern Apennines, Italy)". *Geophysical Journal International*. Volumen 113, Issue 3, Pages 739-746, 1993. Royal Astronomical Society.
- [12] M. C. Torres S., "Utilización de los métodos no destructivos –MND– para determinar propiedades físico-mecánicas en rocas sedimentarias". Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería–Geotecnia. Director Jorge E. Puerto G. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, enero de 2005.
- [13] Á. O. Pedroza R. et ál. Avances de la propuesta investigativa "Influencia de las propiedades geotécnicas de los macizos rocosos en la atenuación de ondas sísmicas". Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Geotecnia. 2007.
- [14] J. E. Puerto G., "Métodos no destructivos en mecánica de rocas". *Revista Ingeniería de Minas*. Págs. 55–62. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Sogamoso. Boyacá, Colombia, agosto de 1997.
- [15] L. Brillouin, *Wave Propagation in Periodic Structures*. New York: McGraw Hill. 1946.
- [16] J. C. Santamarina, A. K. Klein y A. M. Fam, *Soils and Waves. Particular Material Behavior, Characterization and Process Monitoring*. New York: Ed. John Wiley and Sons, 2001.
- [17] M. C. Torres S. y A. Alarcón, "Some Aspects about Degradability of Argillaceous Rocks". Proceedings of The Workshop about Rocks Weathering. CEDEX. Madrid, Spain. XI Congress of The International Society for Rocks Mechanics, Julio de 2007.
- [18] J. C. Santamarina y D. Fratta. *Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering*. Virginia, USAACSE Press, 1998.
- [19] M. C. Torres S., A. Alarcón e I. R Berdugo, "Avances recientes en la caracterización de rocas lodosas de los Andes". *Memorias del I Simposio Suramericano de Excavaciones en Roca*. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá, Colombia. En Edición, Septiembre de 2008.
- [20] M. C. Torres S. y J. E. Puerto G. "Métodos no destructivos aplicados a la ingeniería civil y de rocas". *Memorias del VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas*. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Cartagena, Colombia. ISBN 958-33-9677-X. Octubre de 2006.
- [21] RocLab ver. 1.0[®]. Software de uso libre de la marca Rocscience Inc[®]. 2002–2003. Versión introductoria. Disponible en www.rocscience.com.
- [22] M. C. Torres S. y Á. O. Pedroza R. "Una propuesta para determinar factores de escala entre el macizo rocoso y una muestra intacta de laboratorio". *Memorias del I Simposio Suramericano de Excavaciones en Roca*. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá, Colombia. En Edición, Septiembre de 2008.

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2008
Fecha de aprobación: 25 de marzo de 2009