

Criterios geológico geotécnicos para un adecuado diseño de túneles en rocas

Roque García Ruiz¹
roquegarcia1@gmail.com

¹UCAB. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, DF, Venezuela.

Historia del Artículo

Recibido 27 de Abril de 2018

Aceptado 26 de Julio de 2018

Disponible online: 26 de Julio de 2018

Resumen: del libro Geología Aplicada a la Ingeniería Civil, publicado por la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela (2014), han sido seleccionadas distintas partes para formar el presente artículo, relacionado con los criterios geológicos geotécnicos que deben ser tomado en cuenta en excavaciones y sostenimiento de túneles. En la actualidad los distintos sistemas de clasificación del macizo rocoso para el diseño de túneles toman las estructuras geológicas: planos de estratificación, foliación y diaclasas, dentro del término de discontinuidades, generalmente relacionado con observaciones en el frente de excavación. En el término discontinuidad, ampliamente usado en la clasificación de macizo rocoso, deben ser separado los planos formacionales que forman parte de la clasificación de las rocas según su origen, de los planos de diaclasas y/o fracturas relacionados por efectos tectónicos. En un túnel los planos continuos de estratificación o foliación tendrán un efecto de flexión en el macizo rocoso el cual dependerá del espesor de capa, lo cual lo diferencia de las diaclasas por las existencias de puente en roca. Así mismo los sistemas de fracturas, desarrollo y frecuencia, están relacionado con el confinamiento, debiendo ser menos desarrollados a medida que se aleja del perímetro de excavación, lo cual permite variar la resistencia del macizo rocoso, optimizando el sostenimiento.

En el presente el conocimiento del macizo rocoso no se encuentra al día con el avance de la tecnología, estando representado por un simple número el cual puede ser modificado a modelos reales en función de la respuesta del macizo rocoso al ser excavado, lo cual repercute en seguridad y economía.

Palabras claves: Macizo Rcoso, Excavación, Planos de Estratificación y Foliación, Diaclasas, Discontinuidades

Geotechnical geological criteria for an adequate tunnel desing in rocks

Abstract: from the book Geology Applied to Civil Engineering, published by the Andrés Bello Catholic University, Caracas, Venezuela (2014), different parts have been selected to form this article, related to the geotechnical-geological criteria that must be taken into account in excavations and maintenance of tunnels. Currently the different classification systems of the rock mass for the design of tunnels take the geological structures: stratification, foliation and diaclasses planes, within the term of discontinuities, generally related to observations in the excavation front. In the term discontinuity, widely used in the classification of rock mass, must be separated the formational planes that are part of the classification of rocks according to their origin, from the planes of diaclasses and / or fractures related by tectonic effects. In a tunnel, the continuous planes of stratification or foliation will have a bending effect in the rock mass, which will depend on the thickness of the layer, this differentiates it from the diaclasses by the existence of rock bridges. Likewise, the fracture, development and frequency systems are related to the confinement, and should be less developed as it moves away from the perimeter of the excavation, which allows to vary the resistance of the rock mass, optimizing the support.

In the present knowledge of the rock mass is not up to date with the advance of technology, being represented by a simple number which can be modified to real models depending on the response of the rock mass when being excavated, which impacts on security and economy.

Keywords: Rock Mass, Excavation, Stratification and Foliation Planes, Diaclases, Discontinuities

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo es parte de una serie de separatas del libro de R. García R. [1] "Geología Aplicada a la Ingeniería Civil", publicado por la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela. Dicho artículo tiene como finalidad ampliar los criterios que deben ser seguidos en la clasificación de macizo rocoso, relacionados principalmente con el sostenimiento y revestimiento de túneles. Para mayor entendimiento en las figuras tomada del libro se indican el capítulo correspondiente y la sección. En la actualidad el diseño de túneles se basa en la valoración del macizo rocoso principalmente teniendo en cuenta las diaclasas, como patrones uniformes, lo cual puede diferir de las condiciones reales que controla la resistencia del macizo rocoso.

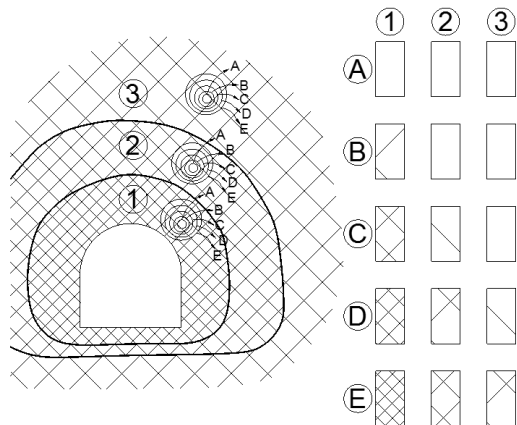


Figura 1: Variación de la resistencia del macizo rocoso en un túnel de acuerdo al factor de escala a medida que nos alejamos de los hastiales.

Los criterios geológicos de reconocidos profesionales en túneles, han considerado el macizo rocoso como un medio cuya anisotropía ha querido ser cuantificada con el término de "discontinuidad", que incluyen los planos formacionales del origen de las rocas con los de fracturas o diaclasas. Así mismo la frecuencia de dichas "discontinuidades" se considera continua a medida que estas se alejan del perímetro de excavación, tomando solo en cuenta el denominado factor de escala, diferenciando en el macizo rocoso la resistencia de la roca en la condición intacta de la resistencia de acuerdo al área involucrada de acuerdo a los nuevos esfuerzos inducidos por la excavación.



Figura 2: Fracturamiento en rocas graníticas. Capítulo 8. Sección 8.2. [1]

En la Figura 1, se muestra la resistencia del macizo de acuerdo al desarrollo y frecuencia de diaclasas, diferenciando tres zona (3), obtenidos a través de mediciones de micro-sísmica en el perímetro de túneles, así como la disminución en la frecuencia de diaclasas a medida que avanzan en profundidad las excavaciones en taludes de corte.

El efecto de descompresión origina a partir de microfisuras el desarrollo de las diaclasas, las cuales tenderán a sistemas similares a las condiciones del macizo en la superficie del terreno.

El efecto del desarrollo de diaclasas se puede detallar en excavaciones, tal como se observa en Figura 2, fotografía correspondiente a la excavación del canal de descarga de la presa Tocomá en el aprovechamiento

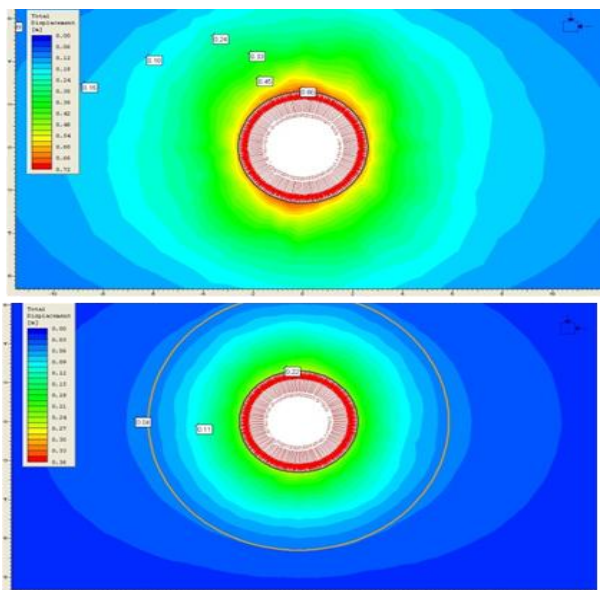


Figura 3: Cálculo de deformaciones mediante el programa Phases 2. Capítulo 11. Sección 11.8. [1]

hidroeléctrico del río Caroní, en Ciudad Bolívar, Venezuela, donde se observa un macizo de granito en condición física fresco, cuyas fracturas se observa con superficie brillante y áspera. Los patrones desarrollados de diaclasas, se observan octogonales y sub-horizontales, clasificándolo como un macizo fracturado, pero cuyo comportamiento alejado del frente de excavación lo clasifica como un macizo sano impermeable que controla el flujo de agua a través del macizo, que limita el gran caudal que pasa por el cauce del río, que se encuentra cercano a la excavación y a unos 30 metros en cota superior. En la actualidad se cuenta con una serie de herramientas de análisis geomecánico para una excavación subterránea, como son: el Plaxis 2D, Plaxis 3D, RocSupport y el Phase, cuyos resultados depende de la valoración del macizo rocoso. En la Figura N° 3, se muestran los resultados de la deformación en un túnel aplicando el programa Phase para obtener la convergencia. En la parte superior se considera un macizo uniforme de características Regular a Pobre y hacia la inferior se ha considerado a dos (2) veces el diámetro un cambio a un macizo de Regular a Bueno, pudiendo observar deformaciones mucho menores.

Los resultados son similares a los que se pueden observar en la Figura 1, donde el macizo mejora su calidad a medida que se aleja del perímetro de excavación. Lo anterior disminuye las deformaciones y repercute en el diseño del sostenimiento y en el revestimiento definitivo, encaminado a una disminución en los costos de construcción.

II. TÉRMINO DISCONTINUIDAD

El término discontinuidad definido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) 1981, se indica lo siguiente: .. “término general para cualquier discontinuidad mecánica en un macizo rocoso que tiene una resistencia a la tracción nula o muy baja. Es el término colectivo para la mayoría de las diaclasas, planos de estratificación débiles, planos de esquistosidad débiles, zonas débiles y fallas”. Las diaclasas son estructuras geológicas que se caracterizan por un comportamiento frágil, donde la componente paralela a la estructura es cero o muy pequeño para que la componente tangencial se aprecie a simple vista. Algunos profesionales utilizan el término genérico discontinuidad para referirse indistintamente a diaclasas, fallas, foliación y estratificación, teniendo en cuenta que la resistencia al corte en estas superficies, siempre es menor que la resistencia de la roca intacta que constituye el macizo. En la definición del ISRM, no se toma en cuenta que los planos de estratificación y foliación constituyen planos continuos originales de las rocas y no corresponden al efecto mecánico en la formación de diaclasas.

El conocimiento básico del origen de las rocas nos da una primera clasificación del macizo rocoso, donde en los términos Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas, diferencian la presencia de masa uniformes como las rocas Ígneas, del resto de las rocas donde la presencia de planos formacionales constituyen una primera anisotropía en el comportamiento mecánico, a

cualquier patrón de esfuerzo-deformación. Garcia E., Garcia R. [2]

Los planos continuos formacionales, constituyen planos de debilidad, los cuales limitan las capas en la secuencias sedimentarias, donde cada capa se comporta con propiedades mecánicas distintas pero el conjunto depende de la posición de dichos planos con respecto al esfuerzo. Los planos de foliación en las rocas metamórficas, pueden limitar espesores litológicos de más de 1 metro o constituir secuencias foliadas, con espesores de milímetros o centímetros. En estos últimos se pueden diferenciar secuencias de litología distintas, así como variación en la cementación en los planos de foliación, cuyo

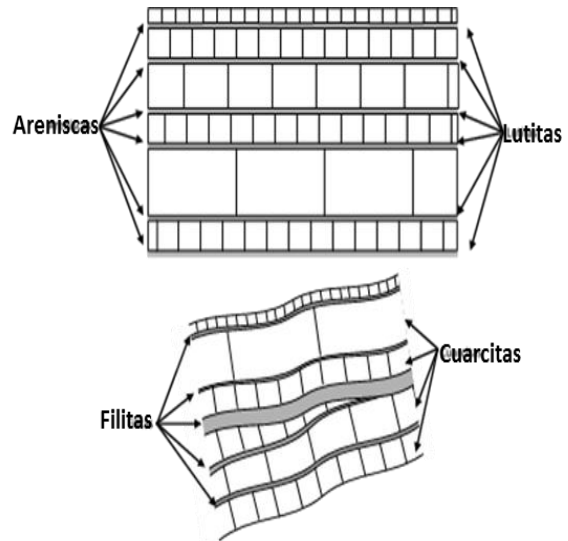


Figura 4: Variación de la frecuencia de diaclasas según el espesor de capa. Capítulo 7. Sección 7.3. [1]

comportamiento mecánico dependerá de la posición del esfuerzo con respecto a dichos planos.

Las fracturas o sistemas de diaclasas, corresponden a la reacción del macizo a un cambio de esfuerzo, las cuales se desarrollan a partir de microfisuras que se forman cuando esfuerzos tectónicos actúan sobre el macizo rocoso confinado. En general el desarrollo de las diaclasas disminuye con el confinamiento del macizo, controlado por los cambios litológicos. La frecuencia de las diaclasas será proporcional al espesor de capa o intervalos litológicos uniforme, tal como se muestra en la Figura 4. Los sistemas de clasificación existente, consideran los patrones de diaclasas fijos, en general obtenidos de mediciones superficiales o en el frente de una excavación. Lo anterior de acuerdo a observaciones detalladas depende del estado de esfuerzo del macizo, donde las diaclasas se desarrollan a partir de fisuras, debido a la liberación de esfuerzos. Dichos criterios deben ser considerados en la valoración del macizo rocoso para el diseño adecuado del sostenimiento de un túnel, ya que los conocidos efectos de descompresión, constituye un control en el desarrollo de las diaclasas, con menores efectos a partir de cierta distancia de la excavación. Un macizo uniforme granítico, sin fracturas a simple vista, puede desarrollar a partir de microfisuras planos de diaclasas paralelo a la abertura de un túnel, separando franjas de rocas que reaccionan de

una forma explosiva a ser sometidas a la variación de esfuerzos con la abertura.

III. ESPESOR DE CAPA Y DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN

La resistencia por flexión de un elemento depende de la sección y de la longitud libre entre los apoyos hacia los extremos. Una viga de acero o concreto, tiene un comportamiento muy rígido, cuando su distancia libre entre apoyos no es mayor a 5 veces su sección transversal. Similar comportamiento puede tener una capa limitada entre las paredes de un túnel, cuya resistencia a la flexión dependerá de la distancia libre y de su espesor, considerándose sin fracturas. Una capa de 50 centímetros de espesor representa un elemento de gran resistencia para una sección de túnel de 5 metro de ancho, pero su comportamiento será distinto para una sección de 15 metros. El termino espesor de capa puede ser aplicado en rocas metamórficas a intervalos cementados, uniformes, limitado entre planos de foliación de menor resistencia.

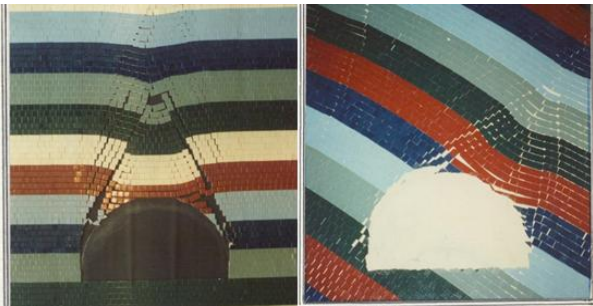


Figura 5: Ensayos en modelo para túnel en dos dimensiones. Capítulo 7. Sección 7.4

En la Figura 5, muestran los resultados de ensayos mediante modelos en dos dimensiones, constituidos con elementos cuadrados de cerámica, orientados según bandas de colores y sometidos a proceso de esfuerzos horizontal, que muestran las deformaciones por flexión en el macizo, con un desarrollo perpendicular al plano de capa. La deformación de la bóveda hacia la cavidad, introduce un efecto de flexión en las capas, las cuales tienden a formar un triángulo invertido desplazado. Lateralmente a dicho triángulo se observan fenómenos de desplazamiento de menor magnitud, posiblemente relacionados por falta de confinamiento.



Figura 6: Óvalos de deformación adaptado a la forma de un huevo. Capítulo 12. Sección 12.3.3 [1]

La magnitud de la deformación por flexión, en secuencia de capas que limitan la cavidad de un túnel, dependerá del espesor y buzamiento de las capas, así como la orientación del rumbo con respecto al lineamiento. La flexión en las capas constituye un control en el proceso de deformación de un túnel, lo cual debe depender de la relación entre el espesor de capa y el diámetro del túnel. Los efectos de deformación se aminoran a medida que nos alejamos de la cavidad, limitado por un macizo estable.

Es importante destacar la alta resistencia de la frágil cáscara del huevo al ser sometido a esfuerzos uniformes de compresión aprisionado entre las manos. Lo anterior nos indica que en una excavación subterránea lo importante es uniformizar los esfuerzos que se generen hacia la cavidad, lo que permitirá la formación de óvalos de equilibrio de mejor control con el sostenimiento. En la Figura N° 6, se encuentra representada en un huevo los fenómenos observados en los modelos anteriores.

IV. LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Como primera aproximación de resistencia del macizo rocoso, se tiene con la clasificación de las rocas según su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas, estas dos últimas con planos continuos de origen, estratificación o foliación, respectivamente, lo cual deben ser diferenciadas de las diaclasas. Son comunes los gráficos de resistencia a la compresión sin confinar en rocas foliadas, donde se muestra la variación de acuerdo a la posición del esfuerzo con el buzamiento, véase Figura 7, los valores mayores se obtienen cuando la foliación se encuentra horizontal o sea perpendicular a la tensión actuante (90°), siendo

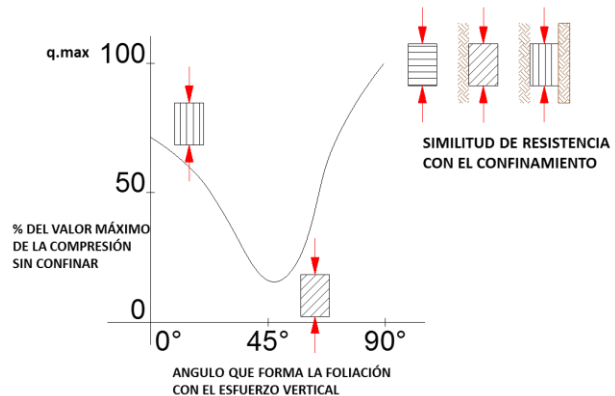


Figura 7: Variación de la resistencia de la roca intacta metamórfica de acuerdo a la sollicitación. Capítulo 3. Sección 3.2.3.2. [1]

menor cuando la dirección del esfuerzo forma un ángulo de 30° a 60° con la inclinación de la foliación, y alcanza un valor intermedio cuando la foliación esta vertical formando 0° con el esfuerzo. Si cuando la foliación se encuentra inclinada, y tenemos el buzamiento en una condición de confinamiento lateral, su resistencia deber ser mayor, similar condición cuando la foliación se encuentra vertical y confinamos la muestra lateralmente. García R. [4]

En la Figura 8, se muestra una secuencia de rocas sedimentarias, constituidas por capas de distinta

dureza, la resistencia de cada capa dependerá de la litología, existiendo capas de mayor resistencia y otras de resistencia menor, tal como se muestra a la izquierda de la figura. El conjunto como macizo rocoso, la resistencia dependerá de la posición de los planos de estratificación con respecto a la sollicitación, pudiendo considerarse bajo cuando la posición del plano de estratificación se encuentra inclinada con respecto al esfuerzo, de forma similar a lo descrito para las rocas metamórficas.

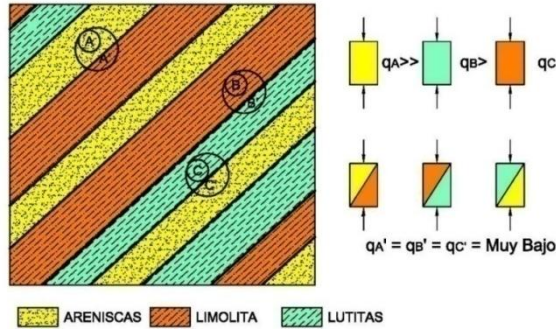


Figura 8: Variación de resistencia considerando las muestras de roca intactas en las distintas capas e integrando el plano de estratificación. Capítulo 8. Sección 8.1. [1].

En rocas ígneas, existe uniformidad en el macizo, para una roca intacta, cualquier orientación en la toma de muestra, para el caso de compresión sin confinar, se obtendrían valores de resistencias similares. En el caso del macizo rocoso ígneo la resistencia dependerá en el volumen de muestra, el número y orientación de las diaclasas de acuerdo a la dirección del esfuerzo.

V. RELACIÓN ENTRE EL RQD Y LOS SISTEMAS DE DIACLASAS.

El termino RQD (RockQualityDesignation de Deere 1963) tan difundido en la clasificación de las rocas, generalmente aplicado con buena correlación a la condición del macizo rocoso, se deben diferenciar, tal como lo indica el autor, las diaclasas de los planos continuos, estos últimos no deben ser tomados en cuenta. En una excavación subterránea en la relación entre el diámetro del túnel y el RQD, es importante cuantificar cuantos trozos de longitud mayor o igual a 10 centímetros se encuentra en un (1) metro de perforación, pudiendo existir para un 100% RQD, un solo núcleo de un (1) metro o 10 núcleos de 10 centímetros, siendo importante tomar en cuenta el factor de escala. Hoek-Brown [5]

El RQD en una secuencia de rocas sedimentarias o metamórficas, depende de la orientación de la perforación con las capas o litología foliadas. Si la perforación se encuentra perpendicular u oblicua a las capas o foliación, en general la intercepción de las diaclasas será menor que cuando la perforación se oriente con el buzamiento de la estructuras.

Las familias de diaclasas en general están asociadas al tipo de roca según su origen, en un macizo de rocas ígneas, los sistemas de diaclasas se encuentran con gran desarrollo longitudinal en general con patrones relacionados con la tectónica regional, asociados a 2 o 3 familias, con frecuencia mayor al metro. Las rocas

estratificadas y foliadas, los espesores de capas controlan la frecuencia de las diaclasas, donde una capa delgada no mayor a los 10 centímetros de espesor, puede estar afectada por frecuencias de diaclasas mayores a 10 por metro.

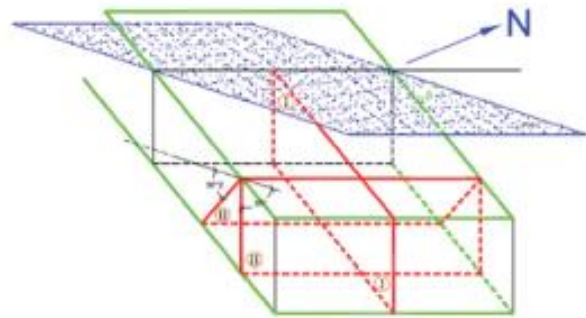


Figura 9: Desarrollo de patrones de diaclasas de acuerdo a la posición de la capa.

Una capa con espesor mayor al metro, la frecuencia de diaclasas puede ser proporcional a dicho espesor.

Los sistemas principales de diaclasas en macizos estratificados o foliados, forman patrones ortogonales, en general perpendicular al rumbo de las capas o la foliación, con buzamiento vertical, y un segundo sistema se destaca con rumbo paralelo a las capas o la foliación, con buzamiento sub-vertical en sentido contrario a dicha estructura.

Otros sistemas de menor importancia ocupan orientación oblicua a lo anteriores, con menos desarrollo. Lo anterior se muestra esquematizado en la Figura N° 9, donde se indican los dos (2) principales sistemas con respecto al rumbo de la capa. El fracturamiento en rocas ígneas puede variar en el macizo, pero en general asociado a fenómenos tectónicos, destacándose su desarrollo longitudinal cuando en el macizo rocoso cambia su estado de esfuerzo. Las diaclasas no son fracturas uniformemente distribuidas en el macizo, sino que su desarrollo y frecuencia depende de la liberación del campo de tensiones de acuerdo a la excavación. Hacia la superficie del terreno, los patrones de diaclasas están bien representados, disminuyendo con la profundidad o confinamiento su frecuencia y desarrollo.

VI. EL RELLENO EN LAS DIACLASAS

En los distintos sistemas de clasificación empíricos se le da gran importancia al relleno en las diaclasas, destacándose presencia de arcilla o cualquier otro mineral, lo cual disminuye la resistencia entre los planos que limitan las diaclasas. Las diaclasas tienen su origen a cambios en el estado de esfuerzos del macizo, cuya abertura se originan principalmente por efecto de erosión en el macizo o cambio de confinamiento por excavaciones, subterráneas o a cielo abierto. Cuando se indica relleno en diaclasas, debe considerarse que existía la abertura y posteriormente que fluidos acompañados de partículas de suelo, se desplazaron a través de la abertura, donde cambio de velocidad del flujo precipitan las partículas en suspensión.

Diaclasas abiertas y relleno con arcillas y/o limos, están asociadas a fenómenos de meteorización, los cuales se encuentran limitados hacia la superficie terrestre, donde se destacan oxidación en los planos de diaclasas, cuyos efectos disminuyen rápidamente a profundidad, estando ausentes a partir de los 30 metros. En macizos rocosos, se indica a profundidad la presencia de agua subterránea,

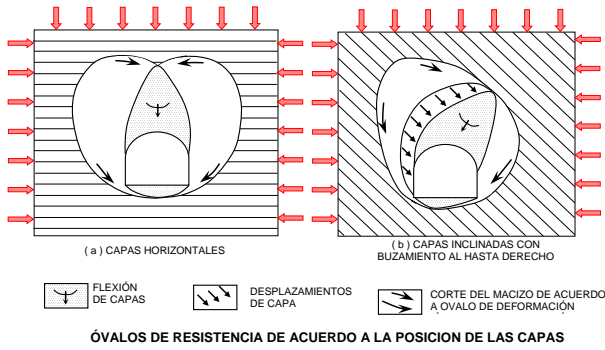


Figura 10: Esquema de los óvalos de resistencia de acuerdo a la posición de las capas. Capítulo 12. Sección 12.3.3. [1]

asociado a una permeabilidad secundaria de fracturas abiertas, cuyo origen se debe a afectos de tensión en el macizo por fenómenos tectónicos. En desplazamiento de macizo por efectos tectónicos, donde la fricción entre los planos, con trituración de la roca, desarrolla brechas características de muy baja fricción, asociadas a los llamados espejos de algunos casos la permeabilidad del macizo está asociada a la roca intacta, como permeabilidad primaria.

Cuando se indican espesores importantes de relleno arcilloso en diaclasas, posiblemente estén asociados a fallas geológicas.

En perforaciones profundas se pueden diferenciar dos tipos de fracturas, unas en general con poca rugosidad, opaca en su superficie y otras con mayor rugosidad más brillante en la superficie, estas últimas formadas por cambio de esfuerzos al extraer el núcleo.

VII. TEORÍA DE DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN EN MACIZOS ESTRATIFICADOS O FOLIADOS

De acuerdo a los modelos anteriores, cuando se excava un túnel en un macizo estratificado y considerando que el esfuerzo vertical del macizo mayor con respecto al horizontal, se desarrolla una deformación de la bóveda hacia la cavidad, debido a efecto de flexión en las capas, las cuales tienden a forma una triangulo invertido de desplazamiento. R. García [6].

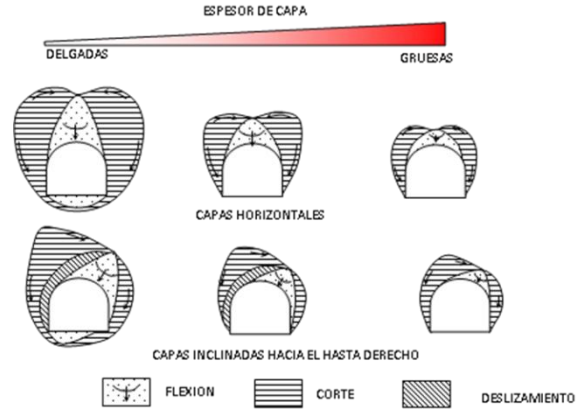


Figura 11: Variación teórica de óvalos de deformación de acuerdo al espesor de capa. Capítulo 12, Sección 12.3.3. [1]

En la Figura 10, se encuentra planteado lo que se ha denominado Óvalos Teóricos de Resistencia en secuencias estratificadas y/o foliadas, considerando un macizo con fracturamiento uniforme a medida que nos alejamos del perímetro de excavación. El área del desplazamiento triangular debe originar un cambio de tensiones laterales donde el macizo tenderá a equilibrarse a medida que nos alejamos de la cavidad. Debido a la liberación del confinamiento de las estructuras geológicas, se generan deformaciones importante hacia la cavidad, donde su mejor control lo constituye el propio macizo, cuya resistencia aumenta a medida que nos alejamos del perímetro del túnel, y la estabilidad de la sección depende en tiempo del confinamiento adecuado en dicho perímetro. Para el caso de capas sub-horizontales, se desarrolla hacia la bóveda un efecto de flexión, cuya profundidad dependerá del espesor de dichas capas. En teoría dicha zona dejaría sin confinamiento un perímetro del macizo rocoso que a su vez origina unos óvalos simétricos de resistencia. La extensión de dichos óvalos depende de los espesores de capas y del fracturamiento. Así mismo en capas delgadas se pueden desarrollar fenómenos de flexión en el piso.

En el caso de capas inclinadas, el fenómeno de flexión se desarrolla perpendicular a la inclinación de dichas capas. La deformación por flexión teóricamente deja sin confinamiento una amplia área hacia la bóveda que en continuación con el hastial izquierdo limitaría una zona sometida a fenómenos de desplazamiento entre dichos planos y cuyo ancho dependerá de la inclinación de las capas y la fricción entre planos. Hacia el hastial derecho los planos estarían inclinados en sentido contrario a la superficie liberada por flexión, destacándose que dichos planos están confinados lateralmente. La amplitud de los óvalos de resistencia debe de estar relacionada con los espesores de capas de mayor resistencia, tal como se muestra en la Figura 11.

Todo lo anterior esta visualizado con una relación de esfuerzo del macizo vertical/ horizontal mayor a 1, en caso de esfuerzos horizontales mayores a los verticales los efectos de deformación serán más complejos, con óvalos de desplazamiento hacia los hastiales.

En una excavación de un túnel se origina un estado de esfuerzo/deformación, que debe alcanzar un equilibrio de alta resistencia a medida que nos alejamos de dicha abertura, formando un cilindro de deformación en tres dimensiones alrededor de la excavación.

VIII. MODELO GEOTECNICO

Un modelo geotécnico en un túnel debe ser representativo de las condiciones litológicas y de las estructuras geológicas, las cuales debido a la abertura, el macizo rocoso serán sometidas a un proceso de tensión/ deformación, a corto y largo plazo, cuya valoración en forma clásica mediante un número empírico, indica uniformidad del macizo alejado del perímetro de excavación, lo cual puede estar muy lejos de las condiciones reales.

Las condiciones geológicas que se observan en el frente de excavación corresponden a la reacción del macizo rocoso con la abertura, con el desarrollo de las diaclasas tanto en frecuencias como en su longitud.

El modelo debe tener toda la información geológica en forma tridimensional, con un estado de esfuerzo originar, el cual será modificado por el diámetro y la orientación de la abertura, permitiendo plantear la en forma teórica la zonificación de resistencia/deformación del macizo. En rocas ígneas la deformación puede ser representada mediante zonas a medida que nos alejamos del perímetro de excavación. En rocas sedimentarias y metamórficas puede ser zonificado mediante óvalos que tendrán como base el efecto de la flexión en capa. Una vez obtenido la zonificación del macizo, pueden ser modelado mediante herramientas de programas existentes para modelo geotécnico en túneles, los cuales aunque en general consideran propiedades uniformes, deben ser adaptados a la zonificación de propiedades mecánicas.

La información básica para el modelo debe considerar los siguientes aspectos geológicos:

- El comportamiento mecánico del macizo rocoso a una excavación subterránea depende primeramente de su clasificación según su origen, pudiendo considerarse uniforme para el caso de rocas ígneas o variable para el caso de secuencias sedimentarias o metamórficas. A lo cual hay que agregarle el factor de escala, diferenciando roca intacta de las dimensiones del macizo sometido a la sollicitación.
- En secuencia sedimentarias y metamórficas es importante considerar el espesor de capa con respecto al diámetro del túnel, donde los efectos de flexión serán mayores cuando la relación Diámetro túnel (D) con respecto al espesor de capa sea mayor a 10.
- Las diaclasas, cuyos patrones pueden ser tomados como base en medidas en la superficie, tendrán un comportamiento similar hacia la

excavación, disminuyendo su frecuencia y desarrollo con el confinamiento, pudiendo considerarse con menores dimensiones, tanto en frecuencia como longitud a medida que nos alejamos del perímetro de la excavación.

- Sobre el relleno en diaclasas, o efectos de meteorización en los planos, dependerán de la profundidad, considerándose ausente por debajo del perfil de meteorización, el cual se encuentra más acentuado en el trópico.

Por lo anterior las condiciones del modelo geotécnico dependerán de la interpretación adecuada de la información geológica, con la generación de una mayor resistencia del macizo rocoso a medida que se aleja del perímetro de excavación.

IX. COMENTARIOS

En los últimos 40 años se han construido decenas de kilómetros de túneles, gran parte de ellos se excavaron en macizos rocosos, donde la clasificación de la roca se basa en los llamados métodos empíricos de reconocidos profesionales a nivel mundial. Dentro de la experiencia en túneles se ha observado que la importancia geológica en el diseño de estos se ha simplificado en un número el cual puede estar lejos de las condiciones reales de respuesta del macizo rocoso a la excavación, pero dentro de rangos de un factor de seguridad más alto. Las observaciones en el frente de excavación de un macizo rocoso no indican la calidad de la roca, sino la respuesta del macizo como resultados de los esfuerzos inducidos en la periferia de la excavación, debiendo seguir a poca distancia del perímetro del túnel por un material de mejor calidad. En general el conocimiento del macizo rocoso no se encuentra al día con el avance de la tecnología, estando representado en la actualidad por un simple número que puede estar muy alejado de la realidad.

X. AGRADECIMIENTO

Se le agradece al Profesor Ingeniero de Minas Roberto Ucar Navarro, de amplia experiencia en mecánica de rocas por la revisión y comentarios del presente artículo.

XI. REFERENCIAS

- [1] García R.R. (2014) "GEOLOGIA APLICADA a la Ingeniería Civil", Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Caracas. Venezuela.
- [2] García E., García R (2004), "El Origen de las Diaclasas en Macizos Rocosos y su Consideración en Obras de Ingeniería". Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG). XVIII Seminario.
- [3] García R. (1998), "Análisis de Deformación en Túneles a partir de Ensayos sobre Modelos en dos Dimensiones". Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Boletín N°58.
- [4] García R. (2006), "El Ensayo de Compresión Simple en Rocas Metamórficas Foliadas". Sociedad Venezolana de Geotecnia. Boletín 85.
- [5] Hoek E. Brown T., (1998) "Practical Estimates of Rock Mass Strength, Int. J. Rock. Mech. Min. Sei, Vol 34, N°8, pp 1165-1186.
- [6] García R. (2006), "Consideraciones sobre Deformación en Túneles y los Parámetros de Resistencia en Macizos Rocosos estratificados y Foliados. Limitación en el uso del Índice de Calidad Geomecánica GSI". Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG). Boletín 86.