

GEOMECANICA DE LOS TUNELES: UNA VISION PRAGMATICA

Gianfranco Perri

Ingeniero Consultor, Profesor de "Diseño Geotécnico de Túneles" en la Universidad Central de Venezuela

Resumen

Se introduce el concepto de clase de comportamiento de una excavación y se define cada una de las siete posibles clases que pueden ser encontradas. Se identifican los elementos discriminatorios de cada clase (los factores de seguridad del frente y de la cavidad), luego los otros elementos asociados a cada clase y finalmente, las intervenciones de estabilización normalmente necesarias para cada caso. Se señala como la clase de comportamiento de una excavación depende, en primera aproximación, de las características geomecánicas de los materiales rocosos constituyentes el macizo (la resistencia a compresión uniaxial), de la macroestructura del macizo (el Geological Strength Index) y del estado de sollicitaciones naturales preexistentes a la excavación (la cobertura). Se propone una formulación aproximada y sencilla para prever, a nivel de proyecto, la clase de comportamiento de la excavación justamente en función de cobertura, compresión uniaxial del material rocoso y geomecánica del macizo y finalmente, se comenta como verificar durante la construcción mediante el monitoreo, la clase real de comportamiento de la excavación.

Introducción

La ingeniería de túneles, a lo largo de su relativamente corta evolución (quizás el año de nacimiento más acertado para la "moderna" ingeniería de túneles es el 1946 en coincidencia con la presentación de la Clasificación de Terzaghi, contenida en el trabajo "Rock defects and loads on tunnel supports", publicado en el libro "Rock tunneling with steel supports by Proctor and Withe. Ohio"), ha reservado a sus adeptos una larga serie de entusiasmos cada vez motivados por nuevas teorías, nuevas herramientas de calculo, nuevas metodologías, nuevas concepciones, todas casi siempre presentadas o asumidas como finalmente exactas, finalmente poderosas, finalmente reveladoras e interpretes fieles del real comportamiento de las excavaciones subterráneas y de las leyes físicas y matemáticas que lo controlan.

Pero, puntualmente, a cada fuerte entusiasmo ha seguido una mas o menos fuerte frustración, motivada por la constatación de las equivocaciones, las inexactitudes, las parcialidades y, cuanto menos, de los límites de cada teoría, herramienta o metodología de análisis y calculo, propuesta.

Así ha ocurrido con la teoría del efecto arco de Terzaghi, con los métodos basados sobre el uso de los índices geomecánicos RMR, RSR, Q, con la técnica de los elementos finitos, con las formulaciones analíticas y numéricas de las líneas características, con los análisis gráficos y analíticos de estabilidad geoestructural, etc.

Claro está que cada vez han resultado contribuciones importantes y a veces trascendentales en el camino del entendimiento de complejo fenómeno de la geostática de las excavaciones subterráneas y del aún más complejo fenómeno de la interacción terreno-soporte y, gracias a tales contribuciones, hoy en día el panorama se revela, aún que con toda su gran complejidad, ciertamente más claro y más cercano a la probable realidad, de lo que se presentaba hace unas pocas décadas.

Pero la frustración se mantiene si esta se asocia a la imposibilidad de disponer de una efectiva teoría y metodología de diseño que sean ampliamente aceptadas y generalmente aplicables, ya que se debe reconocer que son tan grandes los límites de cada formulación propuesta que obligan, una vez más, a recurrir finalmente al análisis observacional del real comportamiento de la excavación en cada caso específico, como la forma finalmente más adecuada de optimizar el diseño y la construcción de las obras subterráneas.

Renunciando en esta ocasión a enumerar y comentar los suficientemente conocidos y reconocidos límites prácticos y teóricos del método de los elementos finitos, de las líneas características, de los índices de clasificación RMR, RSR, Q, etc., dentro del orden de ideas hasta aquí expuesto, a continuación se presenta y amplía el concepto de clase de comportamiento de la excavación, como base insustituible y suficientemente pragmática en el proceso de análisis y diseño óptimo de una excavación subterránea.

Vale quizás la pena solamente comentar como sea, por ejemplo, igualmente ilusorio y limitante el pretender analizar y diseñar un túnel basado en el solo uso de índices de calidad que, como por ejemplo el RMR de Bieniawski, no hacen referencia alguna a los aspectos tensionales y deformacionales del problema reduciendo todo a una caracterización física del medio en que se excavará, así como sea igualmente ilusorio y equivocado el pretender modelar fielmente con métodos de cálculo sofisticadísimos, como por ejemplo el método de los elementos finitos, la compleja naturaleza geológica de los terrenos y la compleja interacción terreno-estructuras, ligada además esta última, íntimamente al proceso constructivo.

Por el contrario, el comportamiento geoestático de una excavación subterráneas o, más esquemáticamente, la clase de comportamiento de la excavación, depende de la combinación de un conjunto de numerosos factores que, con el máximo de la simplificación, pueden identificarse como: el estado de sollicitación natural preexistente en el macizo rocoso y la geomecánica del macizo rocoso.

El estado de sollicitación natural, en primera aproximación, puede (a falta de elementos adicionales como por ejemplo mediciones) asociarse directamente con la profundidad o cobertura (H) de la excavación y la geomecánica del macizo rocoso puede, también con una cierta aproximación, asociarse por un lado con la resistencia de los materiales rocosos dominantes (σ_{ci}) y con el módulo de deformación del macizo (E_m) y por el otro lado con la macro estructura del macizo (fracturas, alteraciones, anisotropías, morfologías de las superficies de las discontinuidades, entre otros); para identificar numéricamente esta geomecánica del macizo rocoso, se pueden usar diferentes índices de calidad geomecánica, como son por ejemplo: RQD, RMR, RSR, Q y GSI, entre otros.

GSI y características geomecánicas de los macizos rocosos

El GSI (Geological Strength Index), introducido por Hoek en 1994, ciertamente es el índice más adecuado para caracterizar geomecánicamente un macizo rocoso con miras a estimar sus propiedades geotécnicas de resistencia y deformabilidad. En tabla gráfica se presenta la versión más actualizada propuesta (Hoek, 1998) para la definición del GSI y a continuación también se propone un conjunto de fórmulas empíricas y gráficos relativos, que permiten obtener las principales características geomecánicas del macizo rocoso, a partir del GSI y de las dos características básicas del material rocoso (la roca intacta): su resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}) y su parámetro del criterio de resistencia de Hoek y Brown (m_i) complementados, cuando disponible, por su módulo de deformación (E).

Se trata de fórmulas deducidas interpretando y completando las indicaciones originales (Hoek y Brown, 1997), que permiten obtener una estimación inicial aunque aproximada, de las características de resistencia (ángulo de fricción, cohesión y compresión uniaxial) y de deformabilidad (módulo de deformación longitudinal) para el macizo rocoso: φ - c - σ_{cm} - E_m :

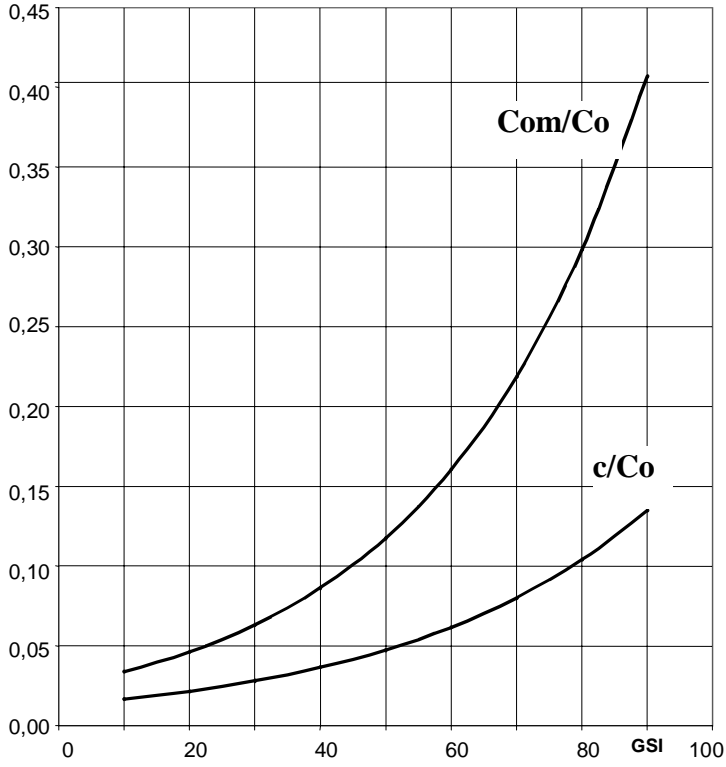
$$\varphi = 0.424 \text{ GSI} - 0.0016 \text{ GSI}^2 - 5 + 9 \text{ Ln } m_i$$

$$c = \sigma_{ci} (0.0058 + 0.0004 m_i) e^{\text{GSI} (0.0455 - 0.007 \text{ Ln } m_i)} \quad \text{o, } c = \sigma_{ci} 0.0013 e^{0.026 \text{ GSI}}$$

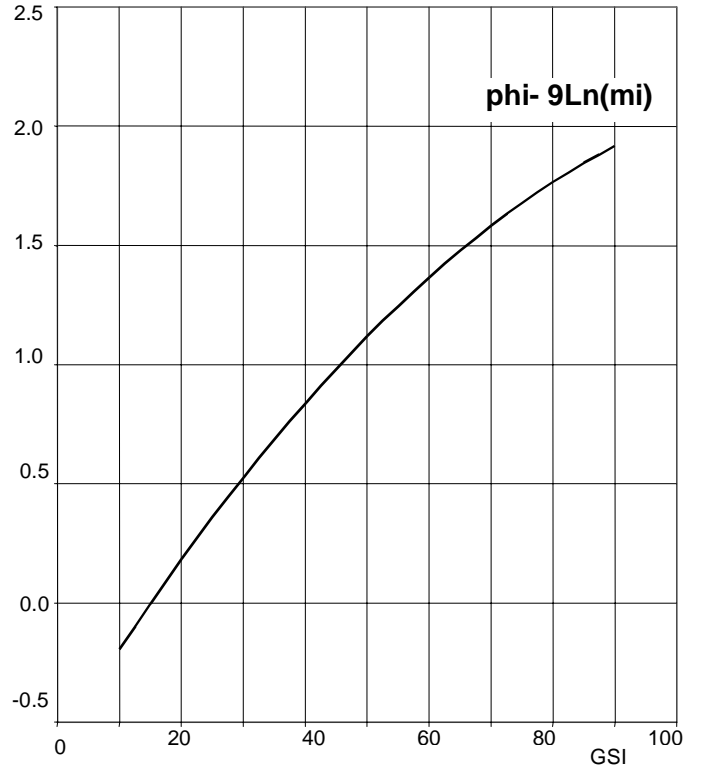
$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} 0.025 e^{0.031 \text{ GSI}}$$

$$E_m = \sqrt{\sigma_{ci}} 10^{(\text{GSI}+70)/40} \quad \text{o, } E_m = E 10^{(\text{GSI}-90)/40}$$

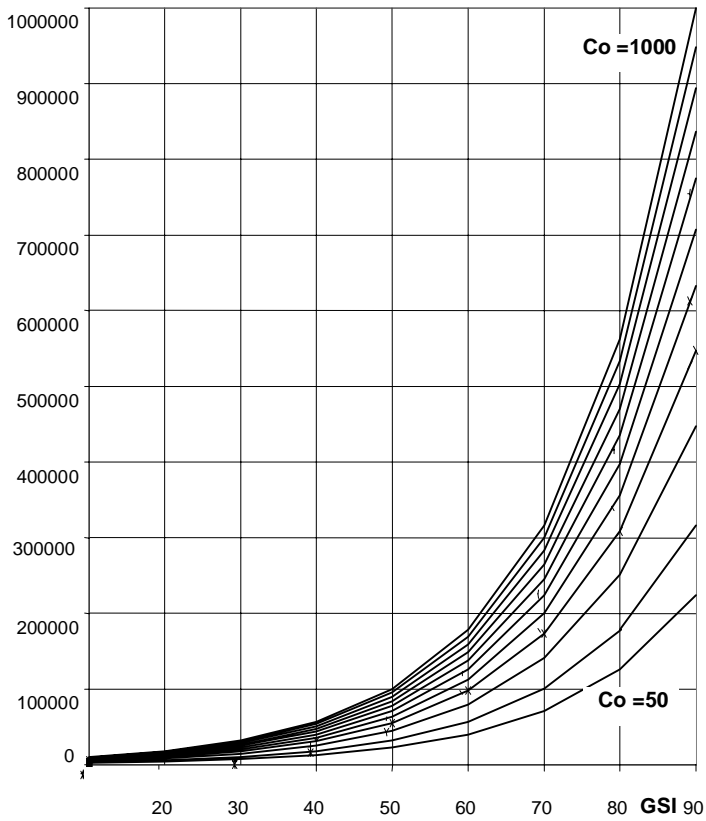
Cohesión y Compresión del macizo rocoso Vs GSI y Co



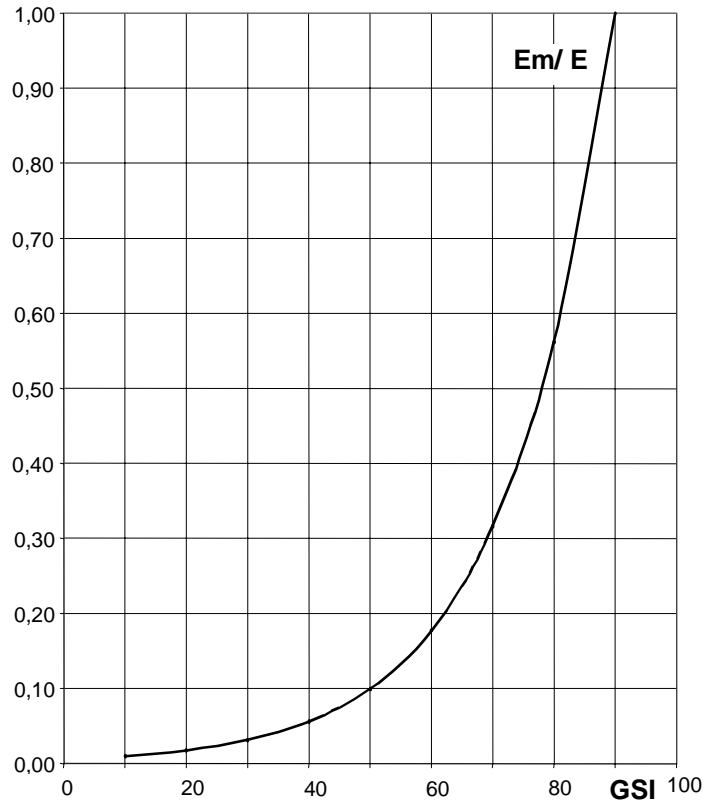
Angulo de fricción (phi) del macizo rocoso Vs GSI y mi



Modulo del macizo (Em) en Kg/cm2 Vs GSI y Co



Modulo del macizo rocozo Vs GSI y Modulo del material



Definición de las clases de comportamiento

Las posibles clases de comportamiento de la excavación, pueden para fines prácticos resumirse en las siguientes 7 (Russo et Al., 1998):

Clases de Comportamiento a y b:

En las clases de comportamiento a y b la resistencia intrínseca del macizo rocoso permite a este de soportar, sea en el frente de excavación sea a distancia de este sobre el contorno de la cavidad, las solicitaciones que se desarrollan como consecuencia de la abertura de la cavidad misma.

La relación de movilización entre resistencia y solicitaciones es por lo tanto siempre mayor de 1; las deformaciones permanecen en campo elástico o casi elástico y son por lo general de modesto alcance. Los eventuales fenómenos de inestabilidad, están conectados a cinematismos gravitacionales de bloques lapídeos: dichas inestabilidades son leves en la clase a, que se puede referir a un macizo rocoso continuo en relación a las dimensiones de la cavidad, y son más marcadas en la clase b, que se puede referir a un macizo rocoso discontinuo y por lo tanto, mas favorable a la formación de cuñas y bloques.

En estas categorías, la cavidad es estable y no pueden ser presumidos fenómenos de decaimiento geomecánico en función del tiempo u otros factores. Las posibles intervenciones de estabilización, están exclusivamente finalizadas a evitar cinematismos gravitativos de eventuales cuñas lapídeas localizadas mediante los análisis geoestructurales. Se asume suficiente por lo tanto, la puesta eventual en obra de pernos localizados y de una capa de concreto proyectado para la protección de caídas de pequeños bloques y para incrementar la seguridad de los trabajos de excavación.

Clase de Comportamiento c:

El estado tensional que se desarrolla en la zona del frente como consecuencia de la abertura de la excavación puede al limite aproximarse a la resistencia del macizo rocoso ($FS > \approx 1$ o $FS \approx 1$) y por lo tanto, pueden surgir deformaciones limitadas en campo elástoplastico, que producen condiciones de incipiente inestabilidad. Los gradientes deformativos del frente resultan sin embargo bajos y la deformación radial (relación entre el desplazamiento radial y el radio de la galería) ya inevitable al frente, resulta muy contenida (por lo general menor que 0,5%).

Sobre el contorno de la cavidad, a cierta distancia del frente, las solicitaciones inducidas superan la resistencia del macizo rocoso ($FS < 1$). Se forma consecuentemente, más allá del perfil de excavación, una franja de roca plástificada, de extensión menor de un radio del túnel, mientras al mismo tiempo se van manifestando convergencias significativas hasta la obtención teórica de una nueva condición de equilibrio.

Las intervenciones de estabilización son generalmente de tipo conservativo basadas en técnicas de contraste pasivo, dirigidas o sea a evitar el completo deconfinamiento del macizo rocoso en el contorno de la cavidad y entonces su descompresión hasta mucho mas allá del mismo contorno.

Tal intento se consigue mediante la puesta en obra de un sistema compuesto por pernos o costillas metálicas livianas y concreto proyectado, capaz de contrastar con adecuado margen de seguridad las cargas radiales calculadas para el equilibrio.

Clase de Comportamiento d:

En la clase d, las solicitaciones actuantes en la zona del frente resultan tales de superar seguramente la resistencia del macizo rocoso ($FS < 1$). La roca en el frente está por lo tanto en estado plástico, pero debido al moderado desequilibrio tensional y/o debido a particulares propiedades del macizo, las deformaciones se desarrollan lentamente en relación a las normales velocidades de avance de la excavación y no se producen

CLASES DE COMPORTAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE LA EXCAVACIÓN

Clases de Comportamiento de la Excavación	Elementos Caracterizantes (Definitorios)	Elementos Determinantes (Discriminatorios)	Elementos Concomitantes (Asociados)	Elementos Consecuentes (Acciones a tomar)
a – b	<ul style="list-style-type: none"> – Estabilidad al frente – Estabilidad en la cavidad – Eventuales inestabilidades (cinematismos de bloques) 	$FSf > 1$ $FSc > 1$ $(Rp/Ro = 1)$	$RMR = > 60$ $GSI = > 70$ $Co = > 40 \text{ MPa}$ $Em = 5000-10000 \text{ MPa}$	Concreto Proyectado (5–10 cm) (Eventual) Pernos L = 3 – 5 m (Eventuales o Sistemáticos)
c	<ul style="list-style-type: none"> – Estabilidad al frente – Cavidad inestable ($\delta o \leq 0.5\% Ro$) 	$FSf > 1$ $FSc < 1$ $(Rp/Ro = 1-2)$	$RMR = 35 - 65$ $GSI = 40 - 75$	Concreto Proyectado (10 – 20 cm) Pernos (L= 4 -6 m) (dens. 1-2/ m2) (o, alt. : Costillas IPN 140-200)
d	<ul style="list-style-type: none"> – Frente próximo al equilibrio – Cavidad inestable ($0.5\% Ro < \delta o < 1\% Ro$) 	$FSf \approx 1$ $FSc < 1$ $(Rp/Ro = 2-4)$	$Co = 20 - 60 \text{ MPa}$ $Em = 2000-8000 \text{ Mpa}$	Ygual a la Clase 'c' + Armado del frente (y del estrados) (Eventual)
e	<ul style="list-style-type: none"> – Frente inestable – Cavidad inestable (grandes deformaciones) ($\delta o \geq 1\% Ro$) 	$FSf < 1$ $FSc < 1$ $(Rp/Ro > 4)$	$RMR = 15 - 45$ $GSI = 25-55$ $Co = 10 - 30 \text{ MPa}$ $Em = 500 - 3000 \text{ Mpa}$	Concreto Proyectado (20 – 30 cm) Costillas IPN 200-300 + Armado del frente (y del extrados) + Pernos integrativos (Eventuales) (o Recalificación preventiva)
f	<ul style="list-style-type: none"> – Inestabilidad generalizada (macizo muy débil y/o zona de fallas) 	$FSf \ll 1$ $FSc \ll 1$	$RMR = < 25$ $GSI = < 30$ $Co = < 20 \text{ MPa}$ $Em = < 1000 \text{ Mpa}$	Concreto proyectado (30 cm) Costillas IPN 300 + Armado del frente (y del extrados) + Presostenimiento (Eventual) + Pernos integrativos (Eventuales) (o Recalificación preventiva)

FSf: Factor de Seguridad al frente = $f(H, Co, GSI) = FSf = 0.3 + \sqrt{80(Co/H) \exp[(GSI - 100)/14] + 600(Co/H)^2 \exp[(GSI - 100)/6]}$

FSc: Factor de Seguridad en la cavidad = $f(H, Co, GSI) = FSc = 25(Co/H) \sqrt{\exp[(GSI - 100)/6]}$

H es la cobertura en metros - **Ro** es el radio equivalente del túnel - **Rp** es el radio plástico - **Co** es la compresión uniaxial en MPa
δo es la deformación radial al frente (como % del radio del túnel) y el principal elemento definitorio de la clase de comportamiento

derrumbes del frente. La deformación radial en el frente resulta, como orden de magnitud, entre 0,5 y 1% del radio del túnel (R_o).

Debido al producirse ya en el mismo frente de deformaciones plásticas, las condiciones de la cavidad lejos del frente, resultan más críticas que las de la clase anterior y la franja plástica se desarrolla en sentido radial en una extensión superior al radio del túnel ($R_p=2-4 R_o$).

En el caso de comportamiento d, se necesitará verificar cuidadosamente el valor del confinamiento necesario para la estabilización de la cavidad, evaluando por lo tanto la posibilidad de utilizar exclusivamente técnicas de contraste pasivo, o por el contrario la necesidad de aplicar conjuntamente intervenciones de carácter conservativo y mejorativo.

En efectos, es muy probable que las acciones de estabilización puedan concretizarse con la aplicación de una adecuada estructura de contraste, constituida por costillas y concreto proyectado, suficientemente pesada para soportar las cargas de equilibrio, eventualmente complementada con una armadura del frente mediante elementos de vidrioresina con el objeto de rigidizarlo lo suficiente para permitir un equilibrio temporal de la cavidad hasta tanto, a distancia de 0.5 a 1.0 R_o , entre a actuar el soporte primario, después de haberse desarrollado una limitada y por lo tanto aun beneficiosa convergencia de la cavidad.

Para las condiciones más críticas, dentro de esta clase de comportamiento "d", la consolidación del frente mediante elementos de vidrioresina se podrá extender en el inmediato estrados del perímetro de la excavación, mediante la colocación de una serie de elementos de vidrioresina periféricos y algo inclinados respecto al eje del túnel para de tal manera afectar, con la acción mecánica de armadura consolidante, una corona de roca inmediatamente externa al perímetro de excavación, contribuyendo de tal forma a limitar la extensión del radio de plastificación de la roca alrededor de la excavación y en consecuencia limitar las cargas finales de equilibrio sobre el soporte primario.

Clase de Comportamiento e:

La clase de comportamiento e, se diferencia de la precedente por una ulterior acentuación de los fenómenos deformativos de la cavidad, sea al frente sea a distancia del mismo. En la zona del frente el desequilibrio tensional es tal de producir altos gradientes deformativos, resultando críticas las condiciones de estabilidad del frente para las normales velocidades de avance. La deformación inevitable en el frente por lo general es superior al 1%. Más allá del contorno de la cavidad, la franja plástica resulta muy extendida ($R_p/R_o \gg 4$) y la convergencia radial muy acentuada.

Para contener el desarrollo de la plastificación, sea más allá del frente de la excavación, y sea en sentido radial, es muy útil una intervención mejorativa de consolidación preventiva del núcleo con elementos resistentes de vidrioresina conectados al macizo rocoso mediante inyecciones de mezclas de cemento, previamente a la instalación de un soporte primario muy pesado eventualmente integrado con la aplicación de elementos radiales de recalificación del macizo rocoso cuya densidad y longitud dependerán esencialmente del comportamiento deformacional del macizo rocoso alrededor de la excavación. Tales elementos radiales podrán también ser constituidos por vidrioresina, o podrán ser guayas o pernos estructuralmente equivalentes, dependiendo de la factibilidad práctica de su construcción, en relación con la densidad y longitud que resulten necesarias.

Finalmente, para los eventuales casos en que a pesar de las intervenciones indicadas, no se llegue a estabilizar la cavidad satisfactoriamente, se deberá realizar, después de la consolidación del frente y antes de la colocación del soporte primario, una recalificación radial de la roca en las inmediatas cercanías del frente de excavación, con el objeto de limitar a las magnitudes máximas admisibles, las cargas de equilibrio sobre el soporte de costillas y concreto proyectado el cual, en tales circunstancias, se deberá colocar a una distancia del frente suficiente para permitir la necesaria descarga controlada de las tensiones naturales dentro de la roca previamente recalificada.

FÓRMULAS APROXIMADAS DE LOS ELEMENTOS DISCRIMINATORIOS DE LAS CLASES DE COMPORTAMIENTO DE LA

EXCAVACIÓN: FSf - FSc

Según el criterio de Hoek y Brown, puede definirse el factor de seguridad:

$$FS = S1/S3 = \left(P_c + \sqrt{mCoP_c + sCo^2} \right) / St$$

St = Esfuerzo medio en las paredes de excavación

P_c = Presión de confinamiento en las paredes de excavación

C_0 = resistencia a la compresión del material rocoso

$St = 1.6 P_0$; $P_c = 0.5 P_0$ en el frente ; $P_c = 0$ en la cavidad

P_0 = Presión geostática natural ($2.5H$)

H = cobertura de la excavación

$$FSf = \left(1.25 H + \sqrt{mCo1.25 H + sCo^2} \right) / 4H$$

$$FSc = Co\sqrt{s}/4H$$

$$FSf = 0.3 + \sqrt{0.08m(Co/H) + 0.06s(Co/H)^2}$$

$$FSc = 0.25\sqrt{s}(Co/H)$$

Asumiendo H en m y Co en MPa y con $m = 10$

$$m = 10 \exp[(GSI-100)/14] \quad s = \exp[(GSI-100)/6]$$

$$FSf = 0.3 + \sqrt{80(Co/H) \exp[(GSI - 100)/14] + 600(Co/H)^2 \exp[(GSI - 100)/6]}$$

$$FSc = 25(Co/H) \sqrt{\exp[(GSI - 100)/6]}$$

Clase de Comportamiento f:

La clase de comportamiento f, se distingue por una inestabilidad a corto plazo del frente y con derrumbes inmediatos en el mismo, como consecuencia de las operaciones de avance.

Tal comportamiento es, por ejemplo, típico de los terrenos incoherentes, de macizos rocosos cataclados, como en las zonas de fallas, o en presencia de fuertes gradientes hidráulicos, o de todos modos en los casos en donde desequilibrios tensionales elevadísimos determinan el derrumbe inmediato del frente al momento de la abertura de la cavidad.

En el caso de cruce de fallas o en los tramos que de todos modos se caractericen por una inestabilidad a corto plazo del frente con condiciones de colapso inmediato, se evaluará en función de las características ge estructurales y hidrogeológicas, la necesidad de intervenciones de pre confinamiento, presoporte o de mejoramiento en avance, o eventualmente una oportuna combinación de dichos métodos. Debido a la reducida capacidad portante de los terrenos, el sistema de contraste de primera fase contemplará además adecuadas soluciones técnicas complementarias (por ejemplo, costillas con apoyo aumentado, tratamiento mejorativo del terreno de fundación de las costillas, arco invertido provisional, etc.).

Caracterización de las clases de comportamiento

Ahora bien, aunque tanto la necesidad así como la definición y tipología de las intervenciones de consolidación de la roca se podrán detallar solamente en fase constructiva mediante la atenta observación y constante monitoreo del comportamiento efectivo de la excavación, pueden preliminarmente introducirse algunas herramientas de análisis aproximado, con el objetivo de predecir el comportamiento de los posibles escenarios futuros en función de los iniciales conocimientos e inferencias sobre la geomecánica de las excavaciones.

En este orden de ideas es necesario identificar, para cada una de las clases de comportamiento de la excavación previamente definidas (de “a” hasta “f”), aquellos elementos que puedan resultar suficientemente “discriminatorios” de las diferentes situaciones, aunque también será igualmente útil identificar para cada clase, aquellos elementos que pueden considerarse como “asociados” aunque no discriminatorios por sí mismos. Naturalmente el cuadro se deberá completar con la identificación de las posibles medidas de soporte y consolidación a tomar para cada clase.

Partiendo de la definición de cada una de las clases de comportamiento de la excavación, puede observarse que los principales elementos “caracterizantes” en cada caso, son la estabilidad del frente y la estabilidad de la cavidad. Estos elementos definitorios a su vez dependen de la compleja interacción entre varias componentes, principalmente: el estado de solicitaciones naturales (cobertura en primera aproximación), la competencia mecánica de los materiales constituyentes el macizo rocoso (en primera aproximación la resistencia a la compresión uniaxial) y la macroestructura del macizo rocoso (anisotropía, fracturación, plegamiento, alteración, etc.) para cuantificar la cual, en primera aproximación, pueden utilizarse los diferentes índices de calidad propuestos tales como por ejemplo, RQD, RMR, RSR, Q, GSI, etc.

Una vez definidos los dos factores de seguridad, respectivamente relativos a la estabilidad en proximidad del frente de excavación y a la estabilidad de la cavidad de la excavación a cierta distancia del frente (FSf y FSc), se propone utilizar la combinación de estos factores de seguridad cuales elementos “discriminatorios” de las diferentes clases de comportamiento de la excavación, según tales valores resulten mayores próximos iguales o menores a 1, como se indica detalladamente en el cuadro anexo.

Este cuadro resumen sintetiza, por un lado la misma definición de las clases de comportamiento de la excavación y luego, los correspondientes elementos “discriminatorios” y elementos “asociados” en forma de rangos, incluyendo finalmente de manera muy esquemática, indicaciones sobre los posibles soportes y las posibles eventuales intervenciones de consolidación a utilizar en cada clase.

TUNELES : DETERMINACION DE LAS CLASES DE COMPORTAMIENTO

Co / Po	BMR = RMR sin corrección por orientación y con factor agua de 15								Co / H Kg/cm2/m
	20	30	40	50	60	70	80	90	
20		d	d	c	c	ab	a		5.00
19		d	d	c	c	ab	a	(a)	4.75
18		ef	d	c	c	ab	a	(a)	4.50
17		ef	d	c	c	ab	ab	(ab)	4.25
16		ef	d	c	c	ab	ab		4.00
15		ef	d	c	c	ab	ab		3.75
14		ef	d	c	c	ab	ab	(c)	3.50
13		ef	d	d	c	ab	ab		3.25
12		ef	d	d	c	ab	ab	(d)	3.00
11		ef	ef	d	c	ab	ab		2.75
10		ef	ef	d	c	ab	ab		2.50
9		ef	ef	d	c	ab	ab		2.25
8		ef	ef	d	d	c	c		2.00
7		ef	ef	d	d	c	c		1.75
6		f	ef	ef	d	c	c		1.50
5		f	ef	ef	d	c	c	(ef)	1.25
4		f	ef	ef	d	d	c		1.00
3		f	f	ef	ef	d	c		0.75
2		f	f	ef	ef	d	c	(f)	0.50
1		f	f	ef	ef	ef	d		0.25
0		f	f	f	ef	ef	ef		0.00
GSI	15	25	35	45	55	65	75	85	GSI

Conclusiones

Persiguiendo el objetivo de utilizar el concepto de clase de comportamiento como instrumento fundamental también en el proceso de preselección del soporte y de la eventual consolidación, se ha elaborado (ver tabla) una formulación suficientemente simple y aproximada para el cálculo de los factores de seguridad de la excavación en cercanía del frente (FSf) y en la cavidad lejos del frente (FSc), en función de solamente los tres parámetros básicos siguientes: Cobertura del túnel (H), Resistencia de la roca (σ_{ci}) y Geomecánica del macizo (GSI).

En efectos el procedimiento ilustrado permite, de una manera simple aunque aproximada, prever en fase de proyecto las clases de comportamiento a esperar así como las probables intervenciones de estabilización necesarias y luego, durante la construcción, permite evaluar mediante el adecuado y necesario monitoreo de la obra (deformaciones en el frente y radialmente, en el perímetro y mas allá del contorno de la excavación) la clase de comportamiento real.

Es importante observar que, así como ilustra la tabla gráfica, para una misma calidad geomecánica del macizo rocoso (GSI), es posible que la excavación tenga un comportamiento muy diferente en cuanto a su estabilidad, dependiendo bien sea de la resistencia (σ_{ci}) de los materiales rocosos presentes, bien sea del estado de sollicitaciones preexistente en el macizo rocoso a nivel de la excavación (Po o mas simplísticamente H).

Con lo anterior se quiere recalcar la no necesariamente directa y unívoca dependencia, muchas veces equivocadamente supuesta, entre la calidad geomecánica del macizo rocoso (por ejemplo su RMR) y el comportamiento de la excavación, muchos menos si se tratara de la relación inversa igualmente a veces (incorrectamente) ventilada: calidad geomecánica del macizo rocoso (RMR) a partir de la observación del comportamiento de la excavación.

Bibliografía

- Hoek E. 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2).
- Hoek E. and Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34(8).
- Russo, G., Kalamaras, G.S. and Grasso P. 1998. Geomechanical Classes, behaviour categories and technical classes for an underground project. *Gallerie e grandi opere sotterranee. March 1998, N.54.*
- Hoek E. 1998. Putting numbers to geology - An engineer's viewpoint. *Quarterly J. Eng. Geol.*