

## PROYECTO DE TÚNELES: CRITERIOS DE DISEÑO

**Gianfranco Perri:** Profesor de Proyecto de Túneles - Universidad Central de Venezuela

*Se ordena y se resume en este trabajo la experiencia acumulada durante los últimos diez años en el diseño y seguimiento constructivo de varias decenas de Kilómetros de túneles venezolanos, entre los cuales resaltan los del Ferrocarril Caracas-Cúa y los del Metro Interurbano Las Adjuntas-Los Teques.*

*Es propicio este momento para reorganizar y sintetizar toda esta valiosa experiencia, en vista de los nuevos retos que se están gestando y que esperan a la ingeniería venezolana, con el proyecto y la construcción de nuevas y más grandes obras subterráneas:*

*La prolongación del Ferrocarril hasta Puerto Cabello, la construcción del Metro a Los Teques, la excavación de los túneles del Metro de Valencia, la construcción de la Línea 4 y la prolongación de la Línea 3 del Metro de Caracas, la finalización del Túnel de Yacambú, son todos ejemplos tangibles de proyectos concretos y en efectivo pleno desarrollo.*

Reflejando la filosofía misma puesta a base de los criterios de diseño que se presentan en este trabajo, a continuación se reportan en sucesión lógica los siguientes capítulos fundamentales que caracterizan al proceso por el cual debe pasar el diseño de las obras civiles de un túnel:

1. Identificación y caracterización geomecánica de rocas y macizos rocosos
2. Sectorización del túnel en zonas macroscópicamente homogéneas
3. Determinación de las clases de comportamiento de la excavación
4. Determinación de las cargas de diseño para soportes y revestimiento
5. Dimensionado del soporte primario y del revestimiento definitivo
6. Definición de los procedimientos de retroalimentación del proyecto

Antes de pasar a describir en detalle cada uno de los puntos señalados e identificados como básicos del proceso de diseño, se considera útil resumir los aspectos más sobresalientes de la filosofía que se pretende adoptar para el mismo:

- Un túnel es una cavidad que debe ser estabilizada a corto y a largo plazo, desde su apertura hasta toda la vida útil establecida para la obra.
- Los factores de seguridad de la cavidad y de la obra, serán diferentes según se trate del corto plazo (durante la construcción), o del largo plazo (durante el ejercicio). Mas que de factores de seguridad deberá tratarse de márgenes de seguridad, o de confiabilidad, o de probabilidad de falla de la cavidad u de la obra. A corto plazo se aceptará una probabilidad de falla relativamente elevada (por ejemplo 1%), mientras que a largo plazo se impondrá una probabilidad de falla muy baja (por ejemplo 0.01%), compatible con el carácter de obra vital y de infraestructura fundamental que posé un ferrocarril metropolitano.
- Las rocas y los macizos rocosos que las albergan, son elementos naturales intrínsecamente heterogéneos y anisótropos y, sin embargo, en determinadas circunstancias, dependiendo del factor escala de la aplicación específica, pueden ser considerados razonablemente homogéneos e isótropos pero su caracterización física y mecánica (geomecánica) es muy recomendable sea expresada en términos estadísticos mediante la adopción de adecuadas distribuciones probabilísticas que permitan reflejar fehacientemente la naturaleza variable de cada una de las propiedades consideradas numéricamente dentro de los algoritmos empleados en los análisis y cálculos del diseño.
- El comportamiento geo-estático de una excavación subterránea depende, entre otros tantos factores, de las características geomecánicas del medio natural en el que se opera, de las solicitaciones naturales preexistentes en el medio, del proceso y procedimiento constructivo adoptados incluyendo la naturaleza misma del eventual soporte instalado y de las circunstancias específicas de tal instalación. Lo anterior se puede reflejar suficientemente en la oportuna definición de “*clase de comportamiento de la excavación*”, que pasa entre otros factores, a través de la caracterización geomecánica del medio (geomecánica del macizo rocoso a excavar) así como de la definición del estado de solicitaciones naturales (función en primera instancia de la profundidad o cobertura del túnel y de la densidad del macizo rocoso).
- El soporte primario, o de primera fase, debe garantizar la seguridad de los trabajadores y la estabilización (posiblemente total) de la cavidad a corto plazo y se pone en obra en condiciones ambientales que pueden llegar a ser incómodas, hostiles y hasta peligrosas, por lo cual los controles de su calidad son normalmente limitados y pueden llegar a ser deficientes, recomendándose en consecuencia no asignar a tal soporte una confiabilidad estructural formal de largo plazo, sino solamente una tarea de colaboración, limitada a algunas funciones y aspectos de algunos de sus componentes específicos. El soporte primario conservativo (como concreto proyectado, costillas metálicas y pernos de costura o trabadura) deberá ser integrado con elementos de refuerzo mecánico (de mejora) del macizo rocoso (tales como por ejemplo, pernos metálicos, vidrio resinas, inyecciones, etc.) o de pre-soporte (tales como por

ejemplo, arcos troncocónicos de concreto en precorte, o de jet grouting o de micropilotes) toda las veces que tal integración resulte necesaria o beneficiosa a los fines de la seguridad y de un adecuado control de la estabilización de la cavidad a corto plazo y que al mismo tiempo redunde en el establecimiento de condiciones estáticas de mayor eficiencia para las funciones del revestimiento definitivo.

- La deformación del núcleo de avance de la excavación representa un elemento fundamental de control de la estabilidad de la excavación misma y por lo tanto, el controlar y limitar la deformación del núcleo de avance (extrusión) incrementando adecuadamente su rigidez, juega un rol determinante sobre la estabilidad misma del túnel, a corto y largo plazo. Lo anterior deriva de la comprobada existencia de un ligamen estrecho entre el fenómeno de extrusión del núcleo al frente de avance y los fenómenos de pre-convergencia y convergencia de la cavidad con dependencia cronológica entre los fenómenos de deformación de la cavidad y los que afectan previamente al núcleo del frente de excavación, así como de un ligamen igualmente estrecho entre la inestabilidad o el colapso del frente o núcleo de avance y la consecuente inestabilidad o colapso de la cavidad, aún si previamente estabilizada.
- El revestimiento definitivo, debe garantizar el adecuado factor de seguridad o la confiabilidad establecida para la obra, absorbiendo las cargas que se estime le sean aplicadas a largo plazo, según los criterios definidos al respecto. En tales cargas, en principio, no se incluirían las acciones sísmicas, a menos que se trate de secciones específicas correspondientes a circunstancias consideradas en estos criterios especialmente sensibles a las acciones sísmicas, tales como por ejemplo ocurre en secciones de túnel muy superficiales o en secciones de túnel excavadas en sectores geológicos especialmente desfavorables (brechas de falla, etc.). En las secciones de revestimiento en que no resulte requerido acero de refuerzo para absorber solicitaciones estáticas, se podrá colocar acero para controlar el agrietamiento por retracción o alternatively, se podrá eliminar tal acero y eventualmente sustituirlo con una adecuada cuantía de fibras, dependiendo todo de las limitaciones que se impongan a la aceptabilidad de desarrollo de las referidas grietas. Cuando el revestimiento no resulte directamente de exigencias estructurales, sus funciones serán entre otras, facilitar la ventilación natural, garantizar la regularidad geométrica de la sección, contribuir a la impermeabilización; en estos casos su espesor será el mínimo compatible con las exigencias tecnológicas (de 25 cm a 30 cm).
- Las formas de la excavación, del soporte y del revestimiento, deben ser seleccionadas en manera tal que resulten estáticamente eficientes, constructivamente factibles y económicamente óptimas, para lo cual en principio estarán caracterizadas por un único arco de círculo, menos que en la solera, la cual podrá ser será seleccionada para cada sector de túnel, desde plana hasta curva con el mismo radio que el resto del perímetro de la sección, a medida en que la calidad geomecánica de la sección de excavación vaya pasando de óptima a extremadamente precaria.

## 1. Identificación y caracterización geomecánica de rocas y macizos rocosos

La identificación de las rocas y de los macizos rocosos que estarán afectados por las excavaciones, puede ser considerada como el punto de partida del complejo proceso por el cual transita el proyecto de un túnel y tal identificación está directamente ligada a los resultados de lo que se denomina tradicionalmente como estudio geológico, o levantamiento geológico, o sencillamente geología del área de emplazamiento de la obra subterránea.

La referida identificación y eventual agrupación de las rocas y de los macizos rocosos involucrados, es importante que sea realizada también con criterio ingenieril y no solamente geológico, en el sentido de considerar en todo momento las condiciones y las propiedades físicas y mecánicas de los materiales y del conjunto.

Ya que el túnel será finalmente excavado y construido dentro del macizo rocoso, será este medio el objetivo final de la caracterización geomecánica, aunque la misma pasará en secuencia, por la caracterización del o de los materiales rocosos (rocas intactas) que conforman al macizo y luego por la caracterización de las estructuras (discontinuidades) que interrelacionan entre ellas las rocas componentes del macizo.

En función de la densidad de fracturas y de la orientación de las fracturas (grado de anisotropía) respecto al medio rocoso, el macizo puede ser esquematizado con un modelo continuo, discontinuo, o continuo equivalente.

En los casos de aplicación de un modelo discontinuo, el objetivo fundamental de la caracterización es individuar las características geométricas y de resistencia de las discontinuidades utilizando por ejemplo, el criterio de Barton que se explicita mediante la siguiente fórmula de la resistencia al corte:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

siendo:

$\tau$  resistencia al corte

$\sigma_n$  esfuerzo normal

$\phi_b$  ángulo de fricción de base (obtenido en muestras de corte sobre superficies lisas, no alteradas)

$JRC$  coeficiente de rugosidad (Joint Roughness Coefficient)

$JCS$  resistencia a la compresión de la pared de la discontinuidad (Joint Compressive Strength).

En los casos de un modelo continuo, o de uno continuo equivalente, de acuerdo con la metodología propuesta por Hoek y Brown (1997), para estimar los parámetros geomecánicos de resistencia y deformación de los macizos rocosos que puedan ser considerados macroscópicamente isótropos en relación con la escala de la aplicación específica, se requiere el conocimiento de los tres siguiente parámetros básicos, dos de ellos relativos a los materiales rocosos que conforman el macizo y el tercero relativo a la macro-estructura del macizo:

- La resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta " $\sigma_{ci}$ "
- La constante " $m_i$ " que define el carácter friccionante de la roca
- El Geological Strength Index "**GSI**" del macizo rocoso.

Se anexan tres tablas que presentan los posibles rangos numéricos correspondientes a cada uno de los tres parámetros referidos, según sugiere Hoek (2.001), las cuales pueden ser utilizadas en primera aproximación para estimar los valores de estos parámetros para cada roca, en ausencia o a complemento de ensayos de laboratorio y levantamientos de campo. Debe señalarse que la tabla del GSI es la elaborada por el Ingeniero Geólogo Truzman (2.000), que representa una adaptación de la tabla original de Hoek a las rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa Central Venezolana.

El siguiente paso es la estimación de las características geomecánicas de resistencia y deformación del macizo rocoso:

- La resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso " $\sigma_{cm}$ "
- La cohesión del macizo rocoso " $c_m$ "
- El ángulo de fricción del macizo rocoso " $\phi_m$ "
- El módulo de deformación del macizo rocoso " $E_m$ ".

Hoek y Brown presentaron los gráficos (anexos) de  $E_m$ ,  $\phi_m$ ,  $c_m$ ,  $\sigma_{cm}$  y, con el objeto de facilitar la utilización de estas estimaciones en la ejecución automatizada de análisis y cálculos, se dispone de las siguientes formulas empíricas para estas cuatro características geomecánicas del macizo rocoso, en función de los tres parámetros básicos ya indicados:

- Perri (1.999): 
$$\phi_m = 0.424 \text{ GSI} - 0.0016 \text{ GSI}^2 - 6 + 9L_n m_i$$
  
$$c_m = 0.75 \sigma_{ci} (0.0058 + 0.0004 m_i) e^{\text{GSI} (0.0455 - 0.0073 L_n m_i)}$$
- Hoek (2.001): 
$$\sigma_{cm} = (0.0034 m_i^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_i)}]^{GSI}$$
- Hoek (1.997): 
$$E_m = 1000 (\sigma_{ci} / 100)^{1/2} 10^{(GSI - 10) / 40} \quad (\text{en MPa})$$

Se debe recalcar que se trata de formulas empíricas que deben ser utilizadas con extremo cuidado y en todos los casos, cada uno de estos siete parámetros geomecánicos es recomendable sea cuantificado en términos estadísticos, asignando a cada uno de ellos una distribución probabilística en función de su naturaleza y unos índices y rangos estadísticos en función de los conocimientos específicos de los cuales sobre ellos se dispone.

Field estimates of uniaxial compressive strength of intact rock.

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, sandstone, schist
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Concrete, phyllite, schist, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rocksalt,
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock, shale
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).


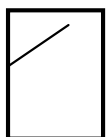

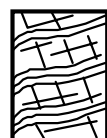
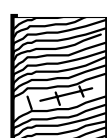
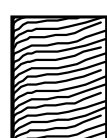

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Values of the constant  $m_i$  for intact rock, by rock group<sup>1</sup>. Note that values in parenthesis are estimates. The range of values quoted for each material depends upon the granularity and interlocking of the crystal structure – the higher values being associated with tightly interlocked and more frictional characteristics.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic				Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated*		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

\* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of  $m_i$  will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

<sup>1</sup> Note that this table contains several changes from previously published versions. These changes have been made to reflect data that has been accumulated from laboratory tests and the experience gained from discussions with geologists and engineering geologists.

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA</b>  A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.		CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA Ligosa, superficies cerradas sin meteorización	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1 mm, rellenos duros	MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blancos	MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con abertura > 5 mm, predominar los rellenos blandos	MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos
		DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE 				
	<b>INTACTA O MASIVA</b> – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación <i>Ej: Cuarzitas, anfibolitas o mármoles</i>	90	80	N/A	N/A	N/A
	<b>POCO FOLIADA</b> – macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas <i>Ej: Cuarzita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas</i>		70			
	<b>MODERADAMENTE FOLIADA</b> – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes <i>Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar</i>		60			
	<b>FOLIADA</b> – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares</i>		50	40		
	<b>MUY FOLIADA</b> – macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas</i>			30		
	<b>BRECHADA/CIZALLADA</b> – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. <i>Ej: Brecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas</i>	N/A	N/A		20	10
						5

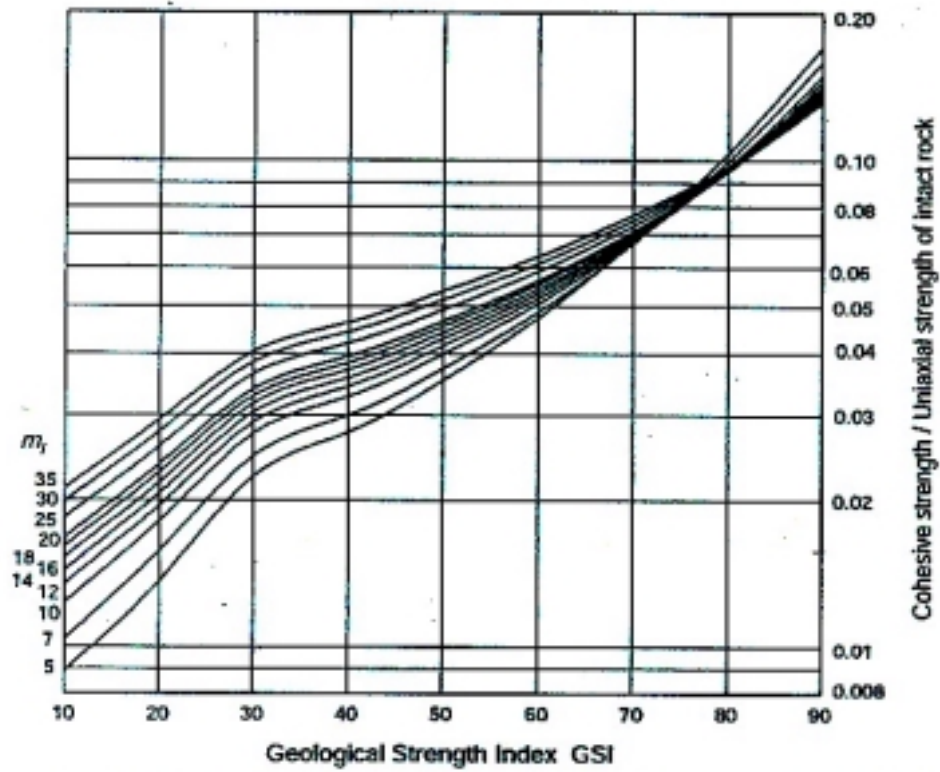


Figure 2. Relationship between ratio of cohesive strength to uniaxial compressive strength of intact rock  $c/\sigma_c$  and GSI for different  $m_i$  values.

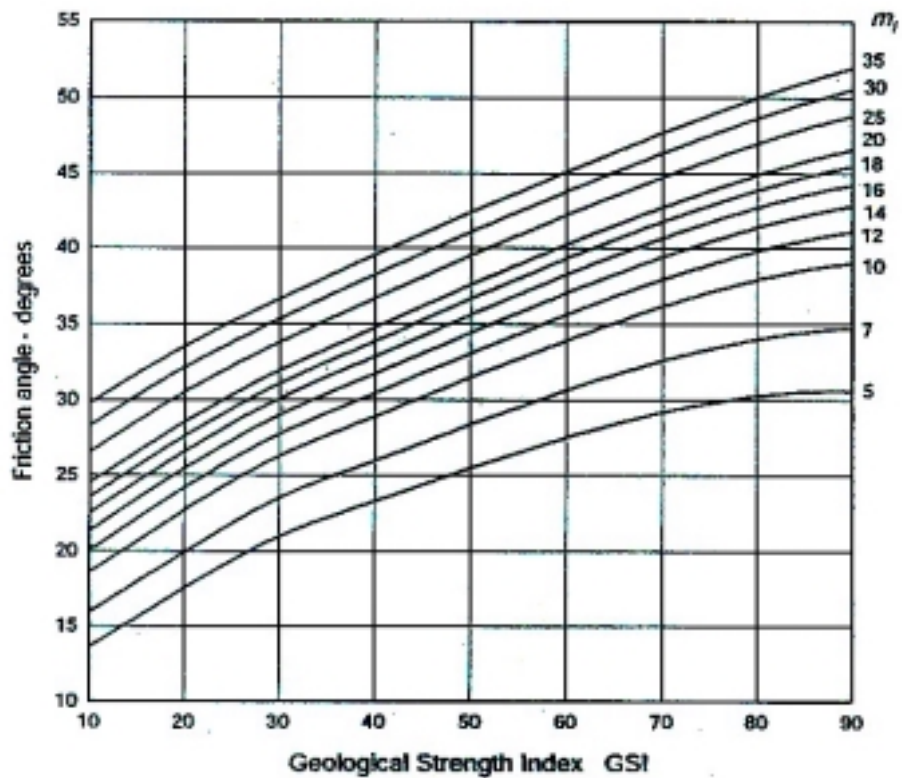
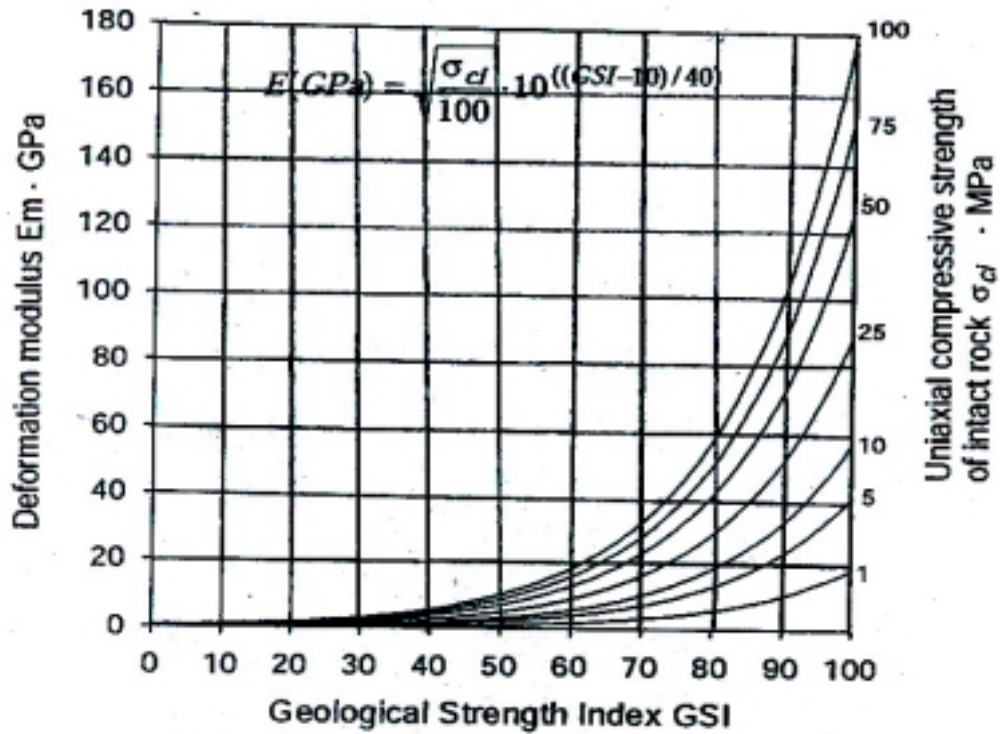
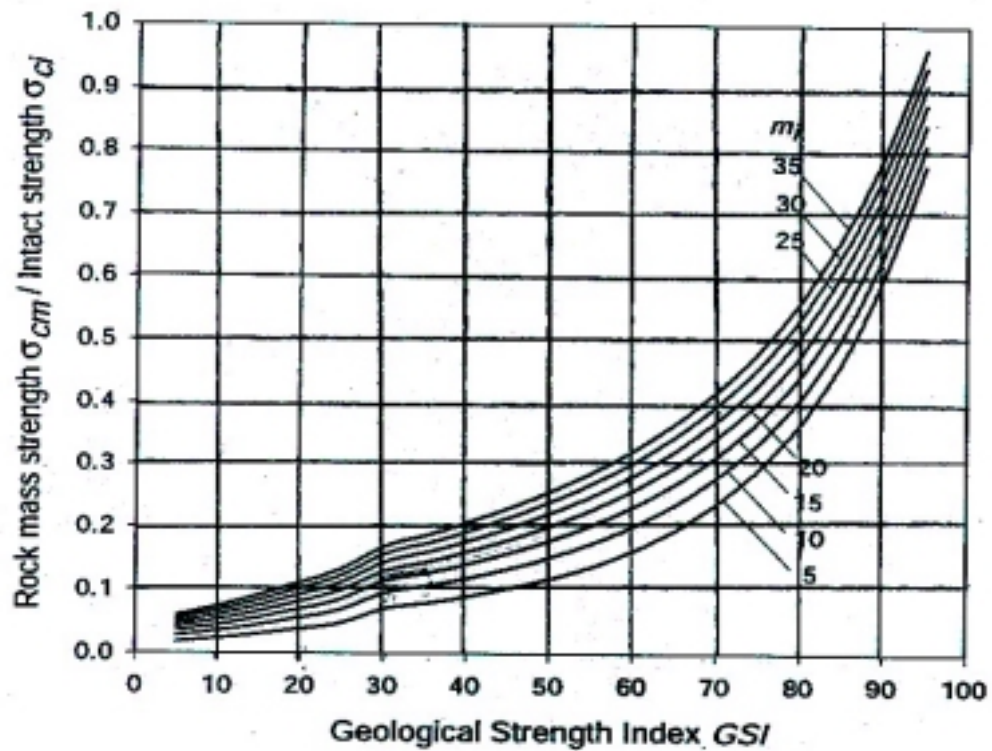


Figure 3. Friction angle  $\phi$  for different GSI and  $m_i$  values.



Rock mass Deformation modulus  $E$  versus Geological Strength Index  $GSI$ .



Relationship between rock mass strength  $\sigma_{cm}$ , intact rock strength  $\sigma_d$ , constant  $m_i$  and the Geological Strength Index  $GSI$ .

Aunque la estimación de los parámetro de resistencia al corte del macizo rocoso (" $c_m$ " y " $\phi_m$ ") con la metodología expuesta, permite la adopción del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb, se considera que el criterio de resistencia mas adecuado a representar el comportamiento mecánico de los macizos rocosos es el de Hoek y Brown, introducido en 1980 y sucesivamente modificado por sus autores hasta su actual versión (2002):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Siendo ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) los esfuerzos principales máximos y mínimos respectivamente (eventualmente efectivos) al momento de la rotura y donde los parámetros ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ), valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad a = 0.5 + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6$$

Siendo **D** un factor que depende del grado de afectación debilitante al cual el macizo rocoso resulte sujeto durante la excavación, debido por ejemplo a las acciones mecánicas propias de los procesos de excavación como las voladuras u otros, o debido a la simple redistribución y consecuente concentración de los esfuerzos preexistentes (asumiendo el macizo rocoso afectado, un típico comportamiento de post falla el cual puede resultar mas o menos debilitante en función también de la misma naturaleza mecánica original).

Este factor **D** varía entre "0", para condiciones naturales o inafectadas del macizo rocoso y "1", para condiciones de macizo rocoso muy afectado y debilitado.

La resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso  $\sigma_{cm}$  se obtiene imponiendo ( $\sigma_3 = 0$ ) y así resultando ( $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$ ) mientras teóricamente, la resistencia a la tracción uniaxial del macizo rocoso también se puede deducir resultando ser igual a ( $\sigma_{tm} = s\sigma_{ci} / m_b$ ) obtenida imponiendo ( $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{tm}$ ).

Debe observarse que el resultado ahora obtenido para  $\sigma_{cm}$  difiere del que se pueda obtener de la formulación empírica (función de GSI y  $m_i$ ) antes reportada y a tal propósito Hoek explica que deben diferenciarse los modelos de análisis que persiguen individuar en detalle el comienzo y sucesiva propagación de la ruptura por compresión para los cuales es útil la formulación teórica ahora deducida, de los modelos de análisis que por el contrario persiguen considerar la resistencia en relación con el comportamiento global del macizo rocoso para los cuales es útil la formulación empírica asociada con el concepto de una "resistencia global a la compresión uniaxial" del macizo rocoso.

Por otro lado finalmente, Hoek recomienda limitar el uso de la formulación empírica de  $\sigma_{cm}$  a ejercicios preliminares ya que por lo general, para alcanzar una aceptable coincidencia de resultados entre los análisis de estabilidad ejecutados con el uso del todavía mas difundido criterio de Mohr-Coulomb y los ejecutados con el mas

adecuado criterio de Hoek-Brown, es necesario calcular la  $\sigma_{cm}$  deduciéndola de su relación con los parámetros de resistencia al corte de Mohr-Coulomb ( $c$  y  $\phi$ ):

$$\sigma_{cm} = [2 c \cos \phi] / [1 - \sin \phi]$$

los cuales pero, deben ser estimados caso por caso en función del nivel de solicitaciones en juego, persiguiendo el objetivo de alcanzar una mejor interpolación de la curva de Hoek-Brown con la bi-línea de Mohr-Coulomb.

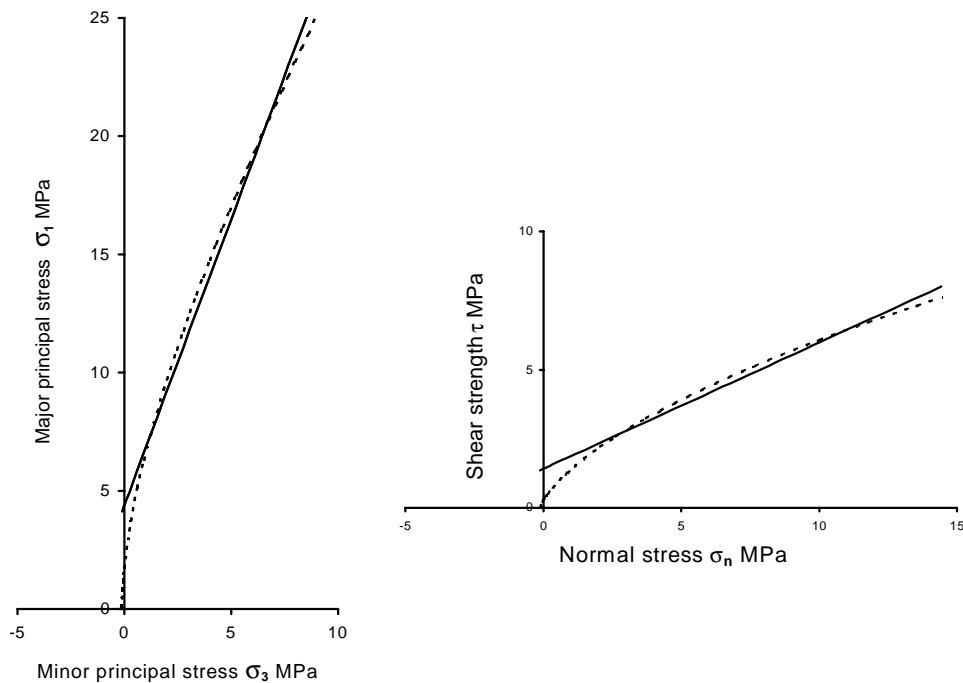
Hoek obtiene con este procedimiento de interpolación formulas para ambos parámetros de resistencia al corte del criterio de Mohr-Coulomb, en función de los parámetros del criterio de Hoek-Brown y en función del nivel de solicitaciones en juego ( $\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$ ), siendo  $\sigma_{3max}$  el límite superior del esfuerzo de confinamiento hasta el cual tiene validez la interpolación y que, para el caso de túneles profundos es aproximadamente igual a  $0.47\gamma H$  [mas exactamente,  $(\sigma_{3max} / \sigma_{cm}) = 0.47(\sigma_{cm} / \gamma H)^{-0.91}$ ]:

$$\phi = \sin^{-1}[(6am_b(s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}) / (2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b \sigma_{3n})^{a-1})]$$

$$c = \sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}](s + m_b \sigma_{3n})^{a-1} / [(1+a)(2+a)[1 + (6am_b(s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))]^{0.5}$$

La formula de  $\sigma_{cm}$  que finalmente resulta de todo este procedimiento es la siguiente:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} [(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) * (m_b / 4 + s)^{a-1}] / [2(1+a)(2+a)]$$



*Interpolación entre parámetros de Mohr-Coulomb y parámetros de Hoek-Brown*

## 2. Sectorización del túnel en zonas macroscópicamente homogéneas

Sobre la base de las características topográficas, morfológicas, geo-litológicas y geo-estructurales del túnel, se deben identificar cualitativamente aquellos sectores que, a todo lo largo del alineamiento del túnel, puedan ser considerados macroscópicamente homogéneos para los fines del sucesivo proceso de análisis y diseño geotécnico-estructural de la obra, el cual así se podrá llevar a cabo solamente para cada uno de los sectores identificados.

En efectos, además de la obvia búsqueda de la homogeneidad de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos a ser involucrados en las excavaciones, lo complejo que resulta el análisis del equilibrio terreno-soporte (interacción), requiere que en este proceso de identificación de los sectores macroscópicamente homogéneos del túnel se tome en consideración entre otros factores, también la cobertura presente sobre la sección del túnel, para lo cual se adopta un esquema que distingue entre las condiciones de túnel superficial, túnel intermedio y túnel profundo, dependiendo de las dimensiones de la sección de excavación y de las características geomecánicas del macizo rocoso:

Se hace así diferencia entre una excavación en roca (Caso A) y una excavación en suelo (Caso B) y/o roca muy blanda ( $GSI < 25$ ), según se ilustra en la figura anexa mas adelante y en la tabla que sigue:

*Clasificación de la excavación por rangos de cobertura*

Condición Cobertura	Clasificación	Caso A (roca $GSI \geq 25$ )	Caso B (roca $GSI < 25$ y/o suelo)
1	Superficial	$H \leq D_i$	$H \leq B$
2	Intermedia	$D_i < H \leq 2.5D_i$	$B < H \leq 2.5B$
3	Profunda	$H > 2.5D_i$	$H > 2.5B$

*Siendo:*

$H$  = Cobertura de la excavación (máxima cobertura  $H_{max}$ );

$D_i$  = Diámetro equivalente de la excavación ( $\cong b$ , siendo "b" el ancho de la excavación);

$B = b + 2 \cdot h \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$ : Ancho del sólido de Terzaghi;

*siendo:*  $h$  = Altura de la excavación ;  $\phi$  = Ángulo de fricción del macizo rocoso.

A este respecto y con el objeto de evitar el producirse de discontinuidades puntuales de diseño muy drásticas y de improbable ocurrencia en la realidad, es recomendable seguir una forma de transición mas gradual entre los dos casos ilustrados (A y B), lo cual se logra modificando el cálculo del ancho del sólido de cargas (B) para  $15 < GSI < 25$ :

$$B = b + 2 \cdot h \cdot \tan(45^\circ - \phi/2) * 15/GSI$$

### 3. Determinación de las clases de comportamiento de la excavación

El comportamiento geo-estático de una excavación subterránea o, aún 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 mismo macizo rocoso.

El estado de sollicitación natural, en primera aproximación, puede (a falta de elementos adicionales como por ejemplo mediciones en sitio) 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 y deformación ( **$\sigma_{ci}$**  y **E**) de los materiales rocosos dominantes y por el otro lado con la macro-estructura geomecánica del macizo (fracturas, alteraciones, anisotropías y morfologías de las superficies de las discontinuidades, entre otros); para identificar la cual se pueden usar diferentes índices de calidad geomecánica (por ejemplo el RMR, el Q, el RSR, etc.) y en especial el ya comentado GSI.

En condiciones de estados de sollicitación natural considerablemente elevados en relación con la calidad geomecánica del macizo natural y simplificando un poco más, puede hacerse directamente referencia a la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso ( **$\sigma_{cm}$** ) y ponerla directamente en relación con el estado de sollicitación natural ( **$\gamma H$** ) siendo ( **$\gamma$** ) la densidad del macizo rocoso, introduciendo el importante concepto de "Índice de competencia de la excavación" ( **$IC = \sigma_{cm} / \gamma H$** ) el cual resultará de gran utilidad al momento de discriminar la clase de comportamiento de la excavación en las circunstancias descritas, mientras para condiciones de valores elevados del referido índice (IC) podrá resultar suficientemente condicionante y discriminante de la clase de comportamiento, la sola calidad geomecánica del macizo (GSI), según se detalla más adelante.

Las posibles clases de comportamiento de la excavación, pueden para fines prácticos (de acuerdo con tres de los autores que han recientemente abordado el tema: Lunardi, Russo y Hoek), resumirse en las siguientes:

- **CATEGORÍA DE COMPORTAMIENTO "A" DE LUNARDI**

Comportamiento a frente estable o de tipo lapideo. Tal categoría es identificable cuando el estado de coacción en el terreno al frente y al contorno de la cavidad no supera las características de resistencia del medio.

El efecto arco se forma tanto más cerca al perfil de la excavación cuanto más este resulte próximo al perfil teórico.

Los fenómenos de deformación evolucionan en campo elástico, son inmediatos y de orden centimétricos.

El frente de excavación es globalmente estable y se pueden producir solamente inestabilidades localizadas de caída de bloques aislados debido a desfavorables

circunstancias geométricas y estructurales del macizo rocoso ya que, en este contexto juega un papel fundamental la anisotropía tensional, y deformacional del terreno.

Las intervenciones de estabilización por lo general están principalmente dirigidas a evitar desprendimientos del terreno para así mantener el perfil de excavación.

La eventual presencia de agua, también en régimen hidrodinámico, no influencia la estabilidad del túnel, a menos que se trate de terrenos alterables o que, gradientes hidráulicos demasiado fuertes provoquen un lavado tal de reducir drásticamente la resistencia al corte a lo largo de los planos de discontinuidad presentes.

Esta categoría, aproximadamente, incluye las clases a/b de Russo y A de Hoek:

- *Clases de comportamiento a y b de Russo (y Clase A de Hoek: ver tabla anexa)*

En las Clases a/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 mucho mayor de la unidad ( $FS > 2.5$ ); 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.

La deformación radial libre de la cavidad (relación porcentual entre el desplazamiento radial y el radio de la galería:  $R_o$ ) es muy baja ( $\epsilon < 1\%$ ); aún menor es la deformación radial al frente ( $\delta_o < 0.5\%$ ); la plastificación (expresada en términos de extensión del radio plástico,  $R_p$ ) es prácticamente inexistente ( $R_p/R_o = 1$ ) y el Índice de competencia resulta ser muy elevado ( $IC > 0.45$ ).

En estas clases, 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 gravitacionales de eventuales bloques lapídeos identificados mediante los análisis geo-estructurales.

En cuanto al soporte a utilizar, se considera suficiente por lo tanto, la eventual puesta en obra de pernos aislados y de una eventual capa poco espesa de concreto proyectado para la protección de caídas de pequeños bloques y para incrementar la seguridad de los trabajos de excavación.

- *CATEGORÍA DE COMPORTAMIENTO “B” DE LUNARDI*

Comportamiento a frente estable a corto plazo, o de tipo cohesivo. Tal categoría es identificable cuando el estado de coacción en el terreno al frente y al contorno de la cavidad, durante el avance, es tal que supera la capacidad de resistencia en campo elástico del medio.

El efecto arco no se produce inmediatamente al contorno de la cavidad, si no a una distancia que depende del espesor de la franja de plastificación.

Los fenómenos de deformación evolucionan en campo elásto-plástico, son algo diferidos en el tiempo y son de orden decimétrico.

El frente, para condiciones normales de velocidad de avance, es estable a corto plazo y su estabilidad mejora o empeora, aumentando o disminuyendo la velocidad de avance.

Las deformaciones del núcleo, presentes bajo la forma de extrusiones, no condicionan la estabilidad del túnel ya que el terreno está aún en condición de movilizar una suficiente resistencia residual.

Los fenómenos de inestabilidad, bajo la forma de desprendimientos localizados presentes en el frente y contorno de la cavidad, dejan en general el tiempo de actuar después de un relativamente limitado alejamiento del frente, mediante el uso de intervenciones tradicionales de contención radial aunque, en raras circunstancias, puede resultar necesario recurrir al empleo de algunas acciones de pre-contención de la cavidad, balanceándolas entre el frente y el contorno, de manera tal de mantener los fenómenos de inestabilidad dentro límites aceptables.

La presencia de agua, especialmente si bajo un régimen hidrodinámico, reduciendo la capacidad de resistencia al corte del terreno, favorece la extensión de la plastificación y aumenta por lo tanto la importancia relativa de los fenómenos de inestabilidad. Es por esto necesario prevenir la presencia del agua, sobretodo en la zona del frente de avance, desviándola para mantenerla en lo posible hacia el exterior del núcleo.

Esta categoría, aproximadamente, incluye las clases c/d de Russo y B/C de Hoek:

- *Clase de comportamiento c de Russo (y Clase B de Hoek: ver tabla anexa)*

En la Clase c, el estado tensional que se desarrolla en la zona del frente como consecuencia de la abertura de la excavación puede acercarse al valor de la resistencia del macizo rocoso ( $FS \approx 2$ ) y por lo tanto pueden surgir ciertas deformaciones en campo elasto-plástico que producen condiciones de incipiente inestabilidad; sin embargo, los gradientes de deformación del frente resultan aún bajos.

Sobre el contorno de la cavidad en cambio, a cierta distancia del frente, las sollicitaciones inducidas superan ciertamente los límites elásticos del macizo

rocoso; la deformación radial libre de la cavidad, aunque limitada, da lugar a la manifestación de convergencias significativas hasta la obtención teórica de una nueva condición de equilibrio con la consecuente formación, más allá del perfil de excavación, de una cierta franja de roca plastificada.

La deformación radial libre de la cavidad vale ( $1\% < \varepsilon < 2.5\%$ ); la deformación radial al frente vale ( $\delta o < 0.5\%$ ); el radio de plastificación vale ( $1 < R_p/R_o < 2$ ) y el Índice de competencia vale ( $0.3 < IC < 0.45$ ).

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

Tal intento se consigue mediante la puesta en obra de un sistema de soporte compuesto por la integración de una capa de concreto proyectado de limitado espesor, con pernos cortos o con costillas metálicas livianas, capaz de contrastar con adecuado margen de seguridad las cargas radiales para el equilibrio.

- *Clase de comportamiento d de Russo (y Clase C de Hoek: ver tabla anexa)*

En la Clase d, las sollicitaciones actuantes ya en la zona del frente, resultan tales de superar seguramente los límites elásticos del macizo rocoso y determinan condiciones precarias para la estabilidad ( $FS < 2$ ). 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 evidentes derrumbes del frente.

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, con una consecuente convergencia radial importante.

La deformación radial libre de la cavidad vale ( $2.5\% < \varepsilon < 5\%$ ); la deformación radial al frente vale ( $0.5 < \delta o < 1\%$ ); el radio de plastificación vale ( $2 < R_p/R_o < 4$ ) y el Índice de competencia vale ( $0.2 < IC < 0.3$ ).

Se necesitará verificar cuidadosamente el valor del confinamiento necesario para la estabilización de la cavidad, evaluando por lo tanto la posibilidad de utilizar aún exclusivamente técnicas de contraste pasivo, o por el contrario la necesidad de aplicar junto con las intervenciones de carácter conservativo también las de carácter mejorativo de pre-contención, como armado del frente y/o su estrados.

En general, es probable que las acciones de estabilización puedan concretizarse con la sola 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 vidrio resina con el objeto de rigidizarlo lo suficiente para

permitir un equilibrio temporal de la cavidad hasta tanto, a distancia del orden de un radio, entre a actuar el soporte primario, después de haberse desarrollado una limitada y por lo tanto aún beneficiosa convergencia de la cavidad.

Para las condiciones más críticas, las intervenciones deben ser predominantemente mejorativas y a tal fin la consolidación del frente mediante elementos de vidrio resina se podrá extender en el inmediato estrados del perímetro de la excavación, mediante la colocación de una serie de elementos de vidrio resina periféricos y algo inclinados respecto al eje del túnel para de tal manera afectar, con la acción mecánica de la armadura de pre-consolidación, 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.

- *CATEGORÍA DE COMPORTAMIENTO "C" DE LUNARDI*

Comportamiento a frente inestable, o de tipo incoherente. Tal categoría es identificable cuando el estado de coacción en el terreno al frente y al contorno de la cavidad, supera la capacidad de resistencia del medio.

El efecto arco no se puede producir ni en el frente ni en el contorno de la cavidad, ya que el terreno no posee suficiente resistencia residual.

Los fenómenos de deformación resultan inaceptables ya que evolucionan rápidamente en campo de ruptura dando lugar a graves manifestaciones de inestabilidad tales como la caída del frente y el colapso de la cavidad, sin dejar el tiempo de actuar con intervenciones de contención radial: se requieren por lo tanto intervenciones de pre-consolidación a monte del frente de avance para desarrollar acciones de pre-contención y capaces de inducir artificialmente los efectos de arco.

La presencia de agua, en régimen hidroestático, reduce aún más la capacidad de resistencia al corte del terreno y, si no es adecuadamente controlada, favorece una mayor extensión de la plastificación y finalmente, incrementa la magnitud de los fenómenos de deformación. La misma agua, en régimen hidrodinámico, se traduce en fenómenos de arrastre de materiales y de sifoneamiento absolutamente inaceptables y peligrosos para la estabilidad global de la excavación. Por lo tanto, es necesario prevenir la presencia del agua, sobretodo en la zona del frente de avance, desviándola para mantenerla en todo lo posible hacia el exterior del núcleo.

Esta categoría, aproximadamente, incluye las clases e/f de Russo y D/E de Hoek:

- *Clase de comportamiento e de Russo (y Clase D de Hoek: ver tabla anexa)*

La Clase e, se diferencia de la precedente por una adicional acentuación de los fenómenos deformativos de la cavidad, sea al frente ( $FS \approx 1$ ) 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 radial libre de la cavidad vale ( $5\% < \varepsilon < 10\%$ ); la deformación radial al frente vale ( $\delta_o > 1\%$ ); el radio de plastificación vale ( $R_p/R_o > 4$ ) y el Índice de competencia vale ( $0.15 < IC < 0.2$ ).

Para contener el desarrollo de la plastificación, sea más allá del frente de la excavación y sea en sentido radial, es muy útil una densa intervención mejorativa de consolidación preventiva del núcleo con elementos resistentes de vidrio-resina conectados al macizo rocoso mediante inyecciones de mezclas de cemento, previamente a la instalación de un soporte primario pesado eventualmente integrado con la aplicación de elementos radiales, también mejorativos, de mejora del macizo rocoso cuya densidad y longitud dependerán esencialmente del comportamiento deformacional del macizo rocoso alrededor de la excavación.

Tales elementos radiales mejorativos podrán también ser constituidos por vidrio-resina, o podrán ser cables o pernos estructuralmente equivalentes, dependiendo de la factibilidad práctica de su construcción, en relación con la densidad y longitud que resulten necesarias.

- *Clase de comportamiento f de Russo (Clase E de Hoek: ver tabla anexa)*

La Clase f, se distingue por una inestabilidad a corto plazo del frente con derrumbes inmediatos en el mismo ( $FS < 1$ ) como consecuencia de las operaciones de avance y en presencia de la convergencia libre de la cavidad muy acentuada.

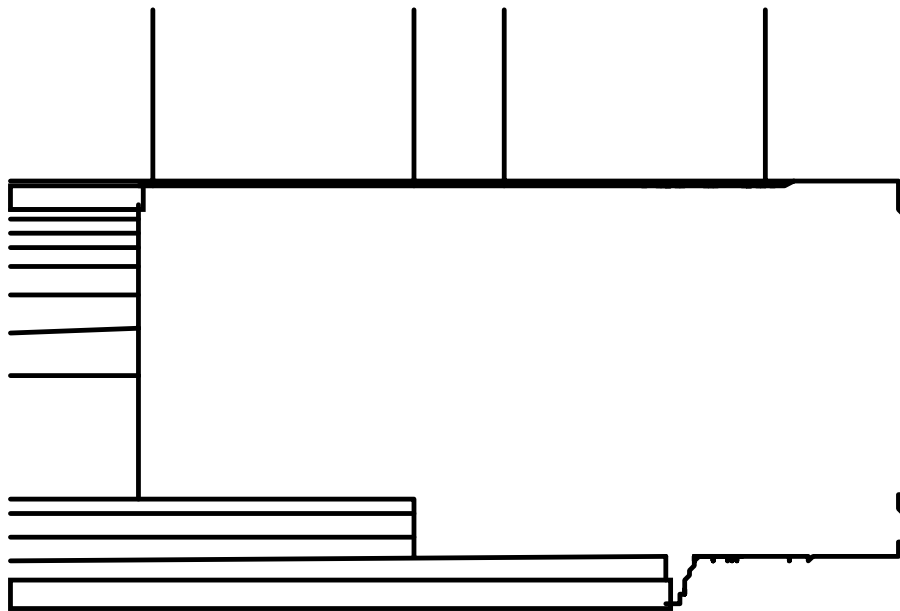
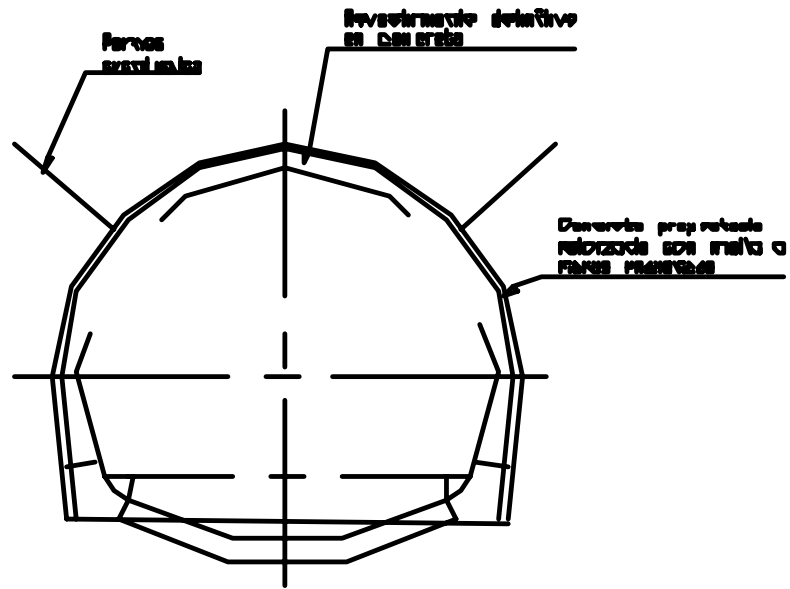
Tal comportamiento es, por ejemplo, típico de los terrenos incoherentes, de macizos rocosos cataclasados, como en las zonas de fallas, o en presencia de fuertes gradientes hidráulicos, o de todos modos en los casos en donde desequilibrios tensionales elevadísimos determinan el derrumbe inmediato del 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 geo-estructurales y hidrogeológicas, la necesidad de intervenciones de pre-confinamiento, pre-soporte o de mejoramiento en avance, o de eventualmente una oportuna combinación de dichos métodos.

La deformación radial libre de la cavidad vale ( $\varepsilon > 10\%$ ); la deformación radial al frente vale ( $\delta_o \gg 1\%$ ); el radio de plastificación vale ( $R_p/R_o \gg 4$ ) y el Índice de competencia vale ( $IC < 0.15$ ).

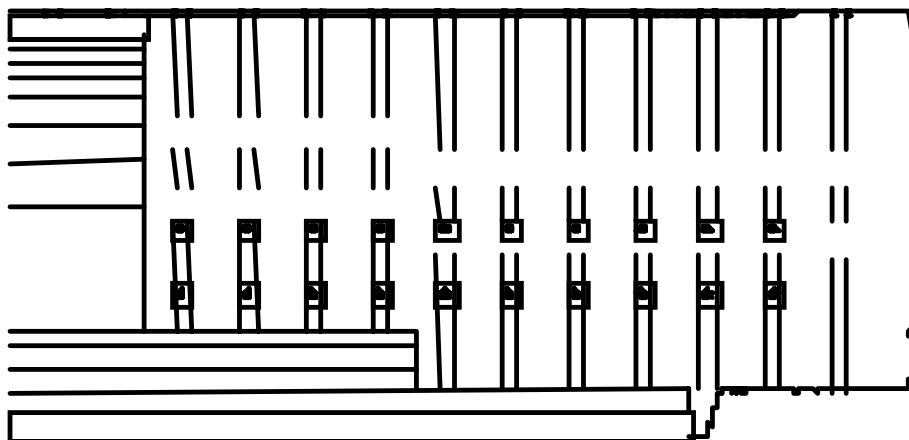
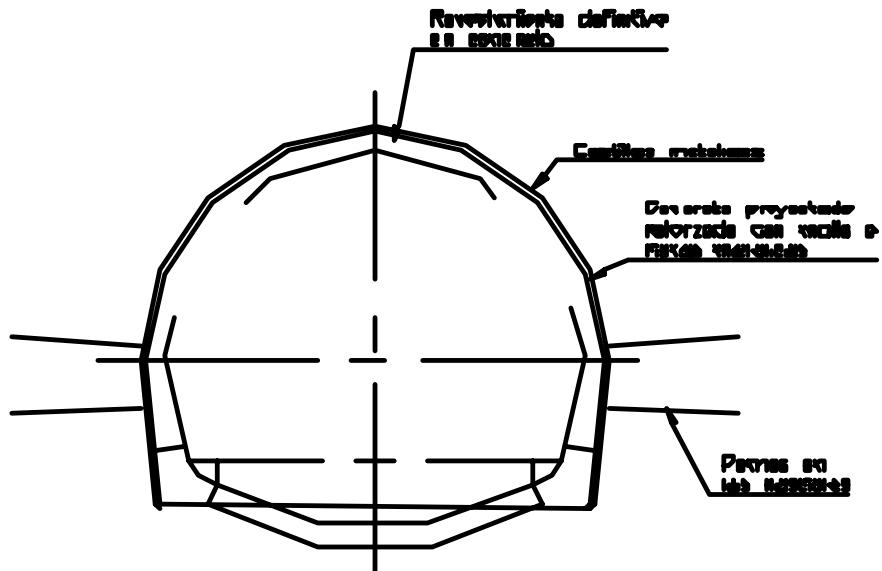
En cuanto al soporte necesario, debido a la reducida capacidad portante de los terrenos, el sistema de contraste de primera fase además de resultar suficientemente pesado e integrado como en la clase anterior, contemplará también adecuadas soluciones técnicas complementarias (por ejemplo, costillas con apoyo aumentado, tratamiento mejorativo del terreno de fundación de las costillas, arco invertido provisional, arco invertido definitivo en avance, arcos de pre-soporte de la excavación, etc.).

# CLASE DE COMPORTAMIENTO "a - b"



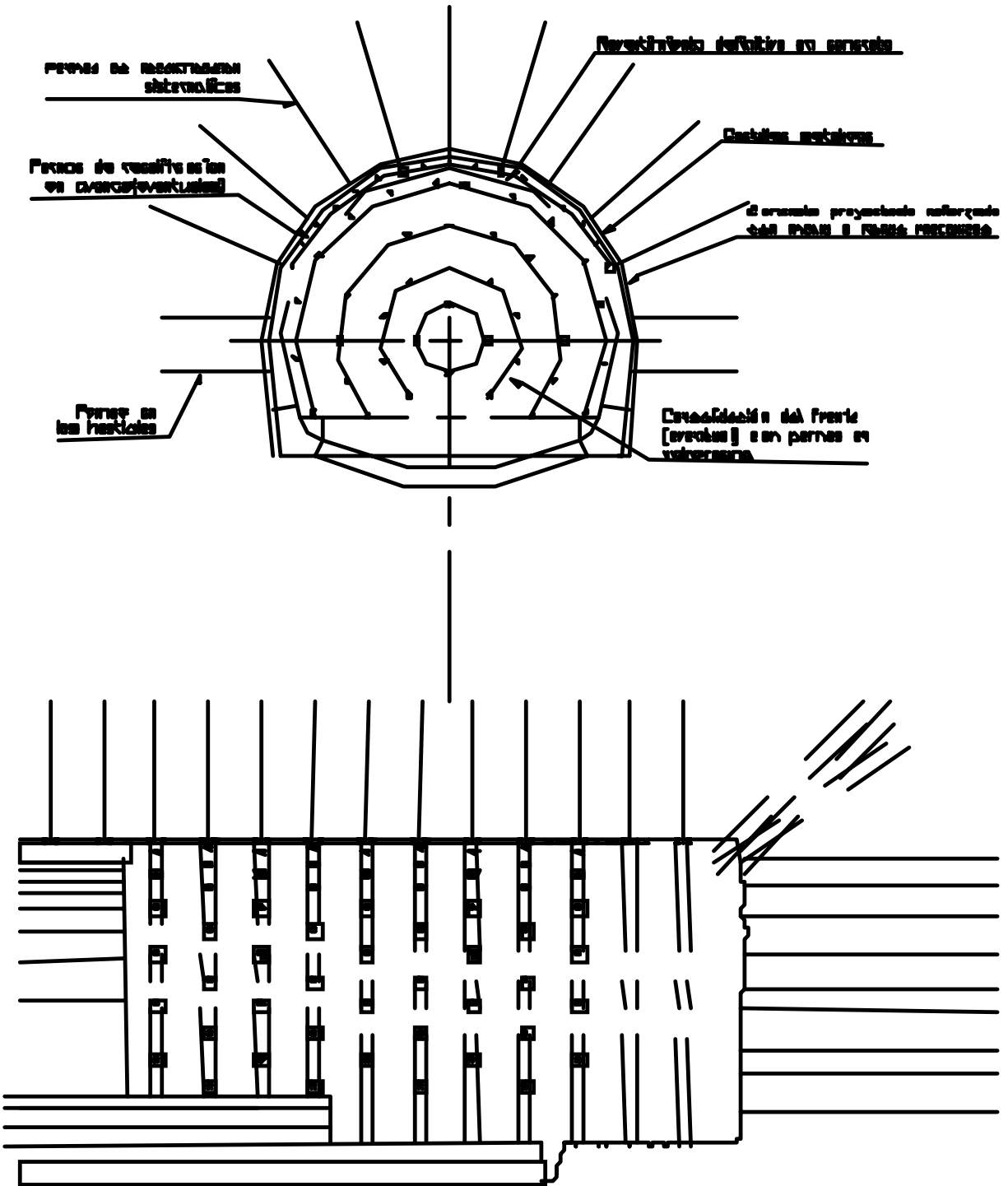
Anteproyecto Tunnels Ferrocarril Caracas-Puerto Cabello

# CLASE DE COMPORTAMIENTO "c"



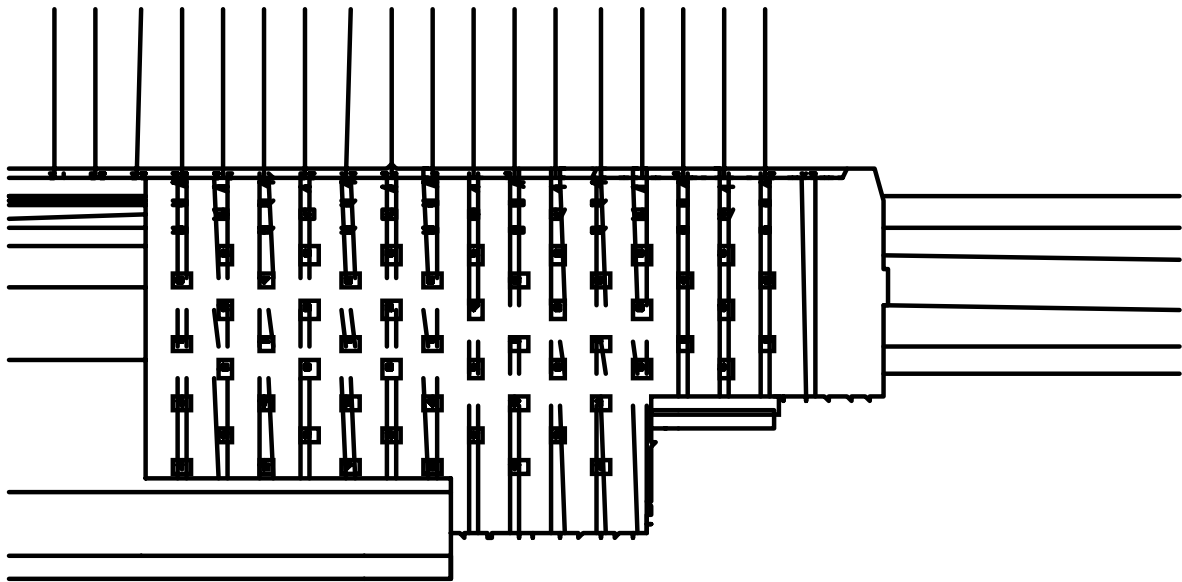
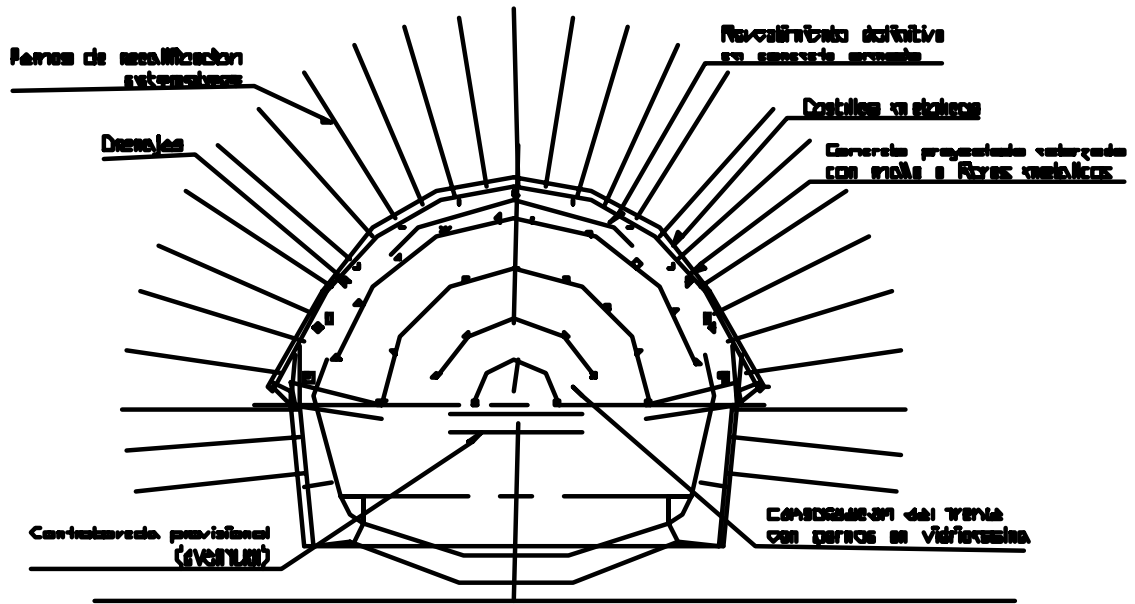
Anteproyecto Tuneles Ferrocarril Caracas-Puerto Cabello

# CLASE DE COMPORTAMIENTO "d"

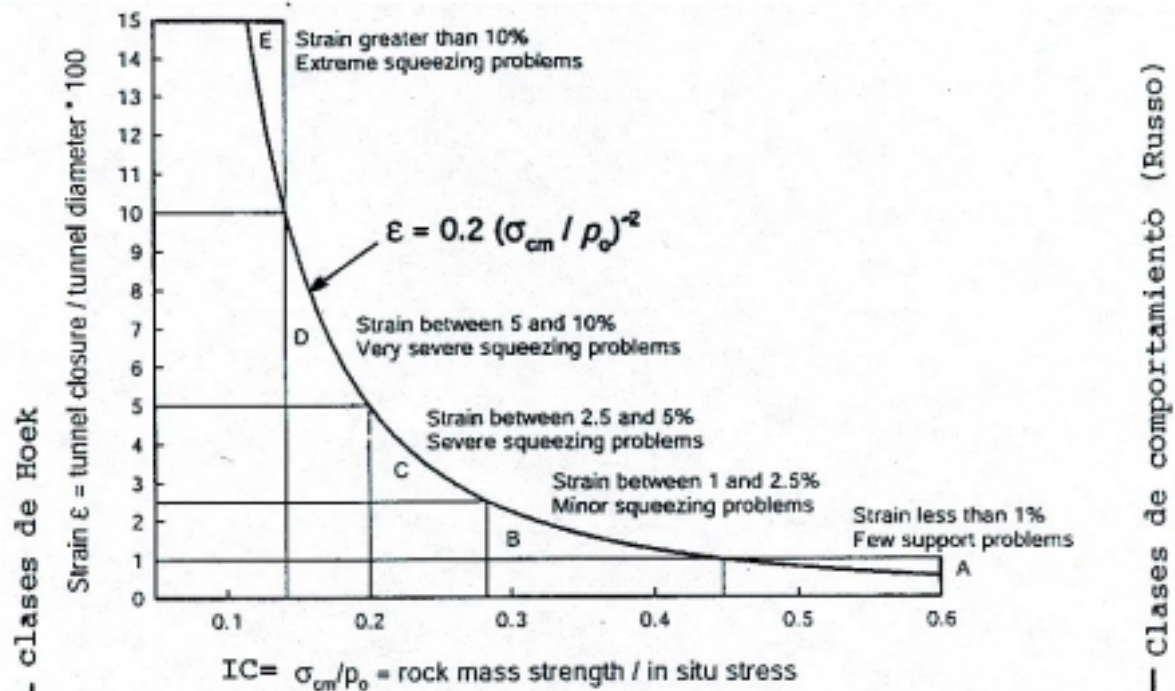


Anteproyecto Túneles Ferrocarril Caracas-Puerto Cabello

# CLASE DE COMPORTAMIENTO "a"



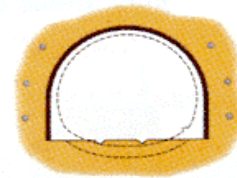
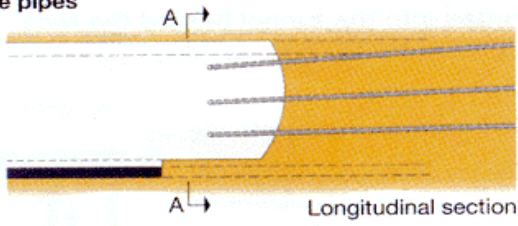
Anleproyecto Túneles Ferrocarril Caracas - Puerto Cabello



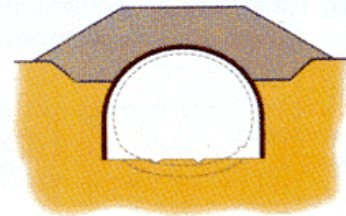
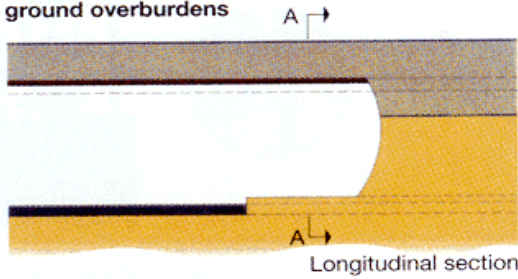
Strain ε %	Geotechnical issues	Support types	
A Less than 1	Few stability problems and very simple tunnel support design methods can be used. Tunnel support recommendations based upon rock mass classifications provide an adequate basis for design.	Very simple tunnelling conditions, with rockbolts and shotcrete typically used for support.	a/b
B 1 to 2.5	Convergence confinement methods are used to predict the formation of a 'plastic' zone in the rock mass surrounding a tunnel and of the interaction between the progressive development of this zone and different types of support.	Minor squeezing problems which are generally dealt with by rockbolts and shotcrete; sometimes with light steel sets or lattice girders are added for additional security.	c
C 2.5 to 5	Two-dimensional finite element analysis, incorporating support elements and excavation sequence, are normally used for this type of problem. Face stability is generally not a major problem.	Severe squeezing problems requiring rapid installation of support and careful control of construction quality. Heavy steel sets embedded in shotcrete are generally required.	d
D 5 to 10	The design of the tunnel is dominated by face stability issues and, while two-dimensional finite analyses are generally carried out, some estimates of the effects of forepoling and face reinforcement are required.	Very severe squeezing and face stability problems. Forepoling and face reinforcement with steel sets embedded in shotcrete are usually necessary.	e
E More than 10	Severe face instability as well as squeezing of the tunnel make this an extremely difficult three-dimensional problem for which no effective design methods are currently available. Most solutions are based on experience.	Extreme squeezing problems. Forepoling, face reinforcement are usually applied and yielding support may be required in extreme cases.	f

Approximate relationship between strain and the degree of difficulty associated with tunnelling through squeezing rock. Note that this curve is for tunnels with no support. (Hoek y Marinos, 2000)

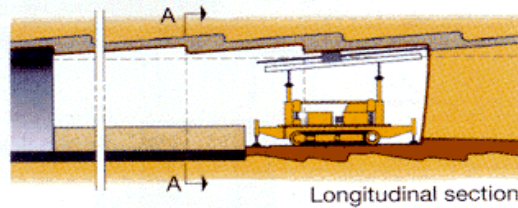
**Drainage pipes**



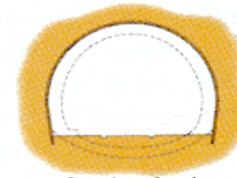
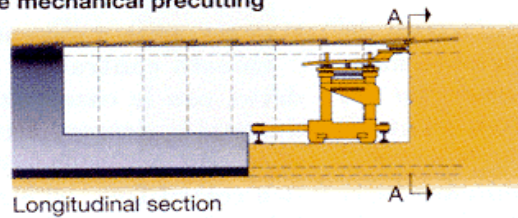
**Artificial ground overburdens**



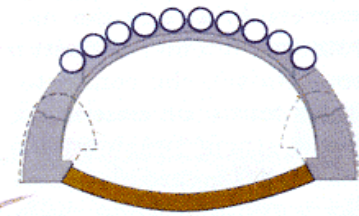
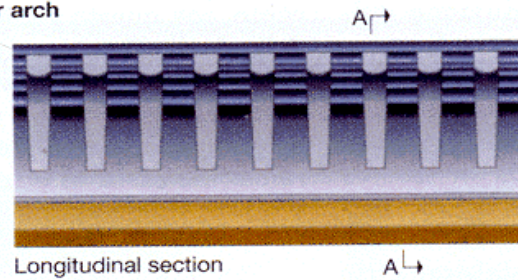
**Full face sub-horizontal jet-grouting**



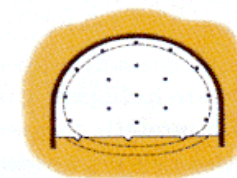
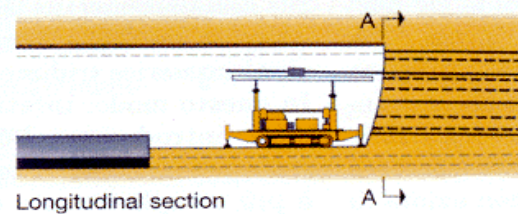
**Full face mechanical precutting**



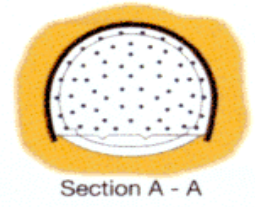
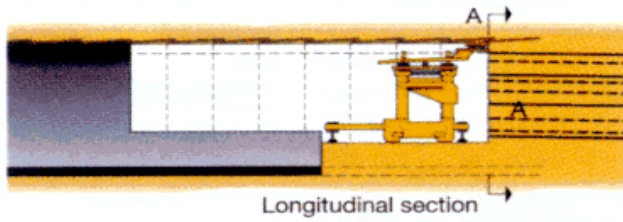
**Cellular arch**



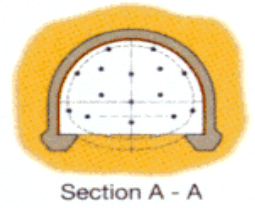
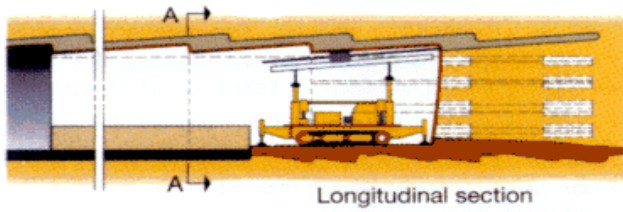
**Core reinforcement by means of fibre-glass structural elements**



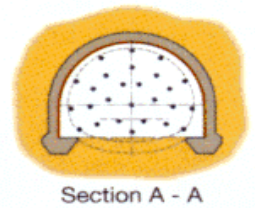
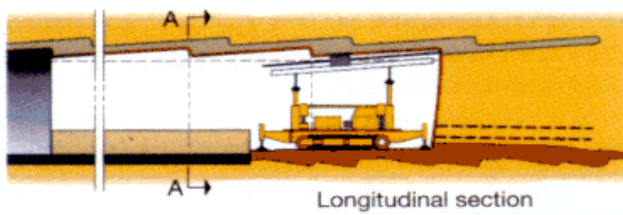
**Full face mechanical precutting or pretunnel and reinforcement of the core using glass-fibre structural elements**



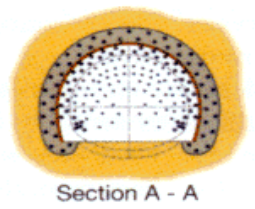
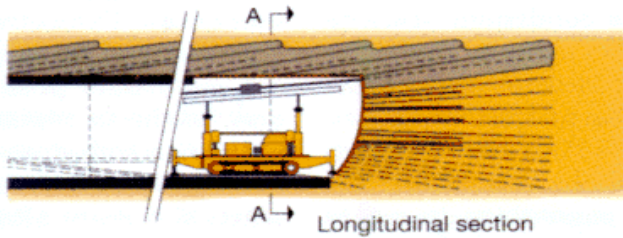
**Sub-horizontal jet-grouting around the cavity and in the core**



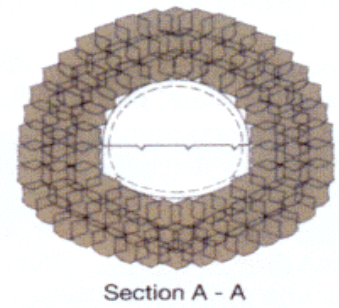
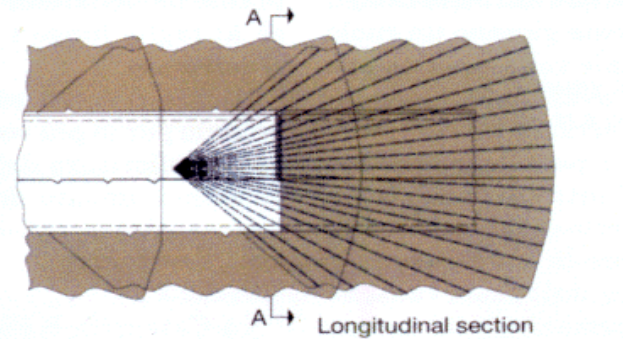
**Sub-horizontal jet-grouting around the cavity and reinforcement of the core using glass-fibre structural elements**



**Ground reinforcement using glass-fibre structural elements around the cavity and the core**



**Low pressure grouting - freezing**



#### 4. Determinación de las cargas de diseño

Para las secciones clasificables como “superficiales” ( $H \leq b$  para  $GSI \geq 25$  y  $H \leq B$  para  $GSI < 25$ ), según la tabla y la figura ya ilustradas, la carga de equilibrio de contraste sobre el soporte primario y las cargas verticales actuantes sobre el revestimiento definitivo, serán las mismas y serán iguales a las cargas gravitacionales ( $\gamma H$ ) correspondientes a un sólido de altura coincidente con la cobertura específica.

Sobre el revestimiento definitivo de estas secciones, las cargas horizontales de diseño serán iguales a las que se deriven de la aplicación de la teoría clásica de empujes sobre estructuras de contención de tierra y actuarán también las acciones sísmicas.

Para las secciones clasificables como “intermedias” ( $b < H \leq 2.5 b$  para  $GSI \geq 25$  y  $B < H \leq 2.5 B$  para  $GSI < 25$ ), según la tabla y la figura ya ilustradas, la carga de equilibrio de contraste sobre el soporte primario y las cargas verticales actuantes sobre el revestimiento definitivo, serán iguales a las cargas gravitacionales correspondientes a un sólido de altura:  $H_p = \alpha(b+h)$ , pero en todos los casos tal altura ( $H_p$ ) no podrá ser menor que el ancho del túnel ( $b$ ), o del sólido de cargas ( $B$ ) según sea el caso, ni podrá ser mayor que la cobertura específica ( $H$ ).

El coeficiente de proporcionalidad ( $\alpha$ ) es función de “GSI” y “ $m_i$ ”, según se refleja en el gráfico de la figura anexa que responde aproximadamente a la fórmula:

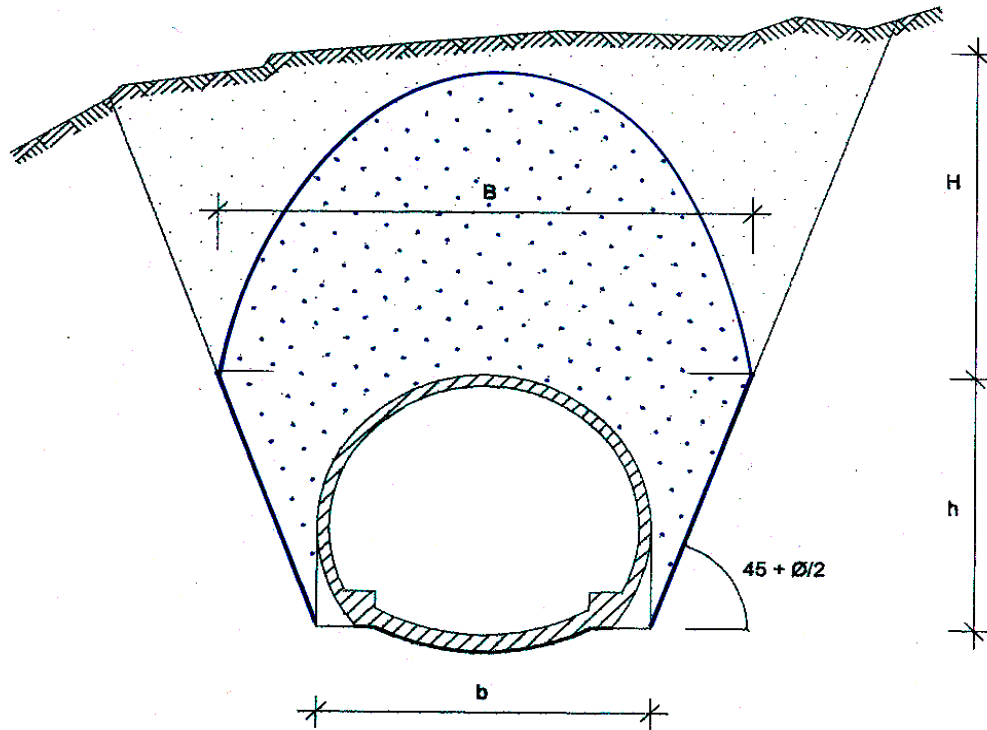
$$\alpha = 1244m_i^{-1,433}GSI^{(0,0004m_i^2-0,0046m_i-1,2344)}$$

Sobre el revestimiento definitivo de estas secciones, las cargas horizontales de diseño serán iguales a las que se deriven de la aplicación de la teoría clásica de empujes sobre estructuras de contención de tierra, o serán simplemente las que se deriven de la reacción elástica de confinamiento ofrecida por el terreno sobre el revestimiento deformable, según indique el modelo de análisis que se aplique en cada caso específico.

Para las secciones clasificables como “profundas” ( $H > 2.5b$  para  $GSI \geq 25$  y  $H > 2.5B$  para  $GSI < 25$ ), según la tabla y la figura ya ilustradas, las cargas de contraste actuantes sobre el soporte primario, serán las radiales que resulten de un análisis estadístico de interacción por líneas características.

Sobre el revestimiento definitivo, las cargas de diseño serán gravitacionales, aplicadas en la zona de bóveda y con magnitud proporcional a la extensión del radio de plastificación establecido en correspondencia del equilibrio alcanzado con la aplicación del soporte primario o del radio que luego se pueda eventualmente alcanzar durante el tiempo que transcurra hasta la efectiva entrada en actuación del revestimiento, mientras las cargas horizontales actuantes serán las resultantes de la reacción elástica de confinamiento ofrecida por el terreno sobre el revestimiento deformable.

## Clasificación de la Excavación por rangos de cobertura



*Cargas de diseño por rangos de cobertura*

Condición Cobertura	Clasificación	Caso A (roca $GSI \geq 25$ )	Caso B (roca $GSI < 25$ y/o suelo)
1	Superficial	$H \leq D_i$ [ $p_v = \gamma H$ ]	$H \leq B$ [ $p_v = \gamma H$ ]
2	Intermedia	$D_i < H \leq 2.5 D_i$ [ $p_v = \gamma \alpha (b + h)$ ] $p_v \text{ min.} = \gamma b$ ; $p_v \text{ max.} = \gamma H$	$B < H \leq 2.5 B$ [ $p_v = \gamma \alpha (b + h)$ ] $p_v \text{ min.} = \gamma B$ ; $p_v \text{ max.} = \gamma H$
3	Profunda	$H > 2.5 D_i$ $p_v = \text{radial/gravitacional}$	$H > 2.5 B$ $p_v = \text{radial/gravitacional}$

*Siendo:*

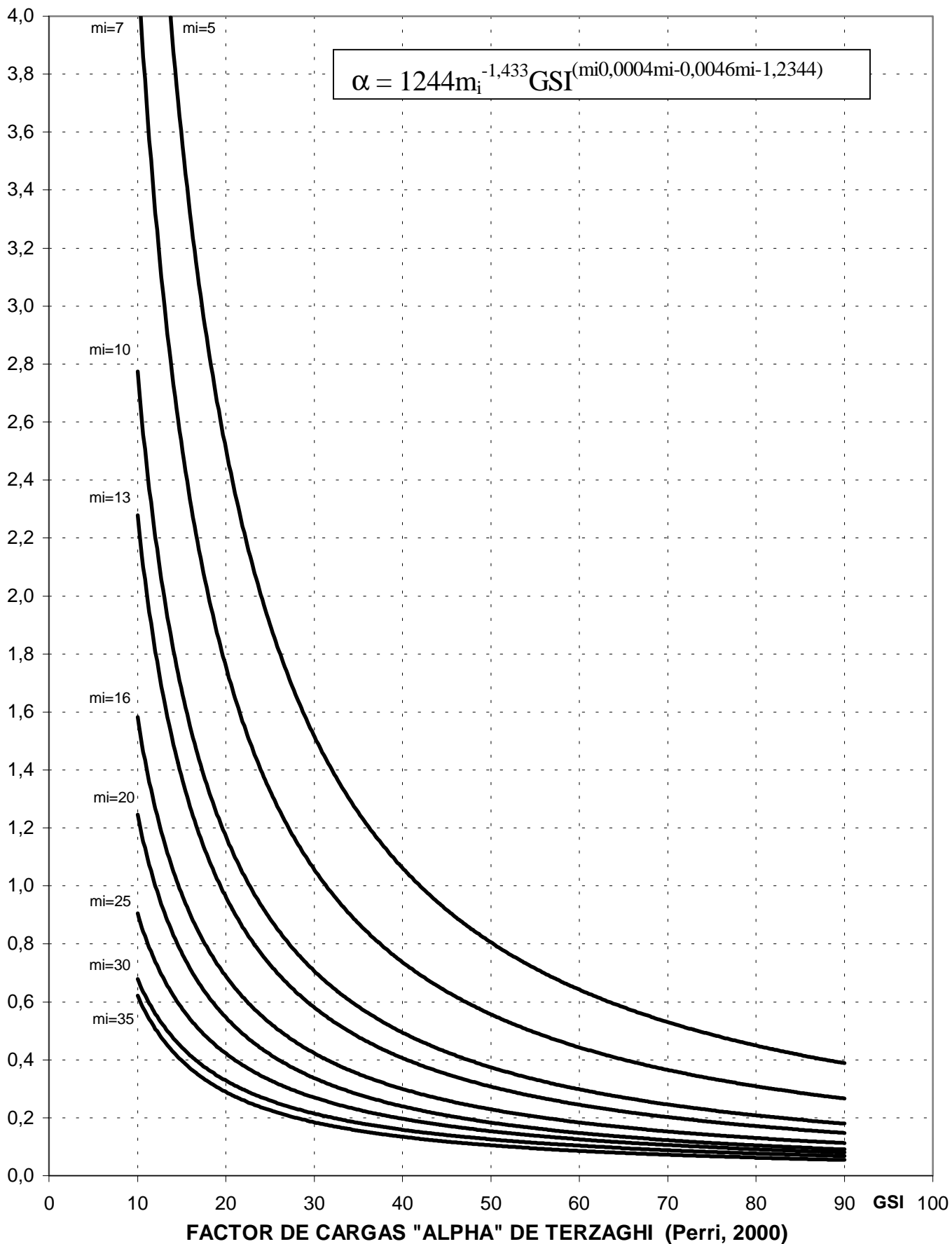
$H$  = Cobertura de la excavación (máxima cobertura  $H_{\text{max}}$ );

$D_i$  = Diámetro equivalente de la excavación ( $\cong b$ , siendo "b" el ancho de la excavación);

$B = b + 2 \cdot h \cdot \tan(45^\circ - \phi/2) \cdot 15/GSI$ : Ancho del sólido de Terzaghi,

*siendo:*  $h$  = Altura de la excavación;  $\phi$  = Ángulo de fricción del macizo rocoso

$\gamma$  = Peso Unitario del macizo rocoso;  $\alpha$  = Factor de carga de Terzaghi.



## 5. Dimensionado del soporte primario y del revestimiento definitivo

### 5.1 Soporte Primario

El análisis será realizado a partir de los Valores Medios y Desviaciones Estándar de las variables aleatorias independientes "GSI", " $\sigma_{ci}$ " y " $m_i$ ".

En el tratamiento probabilístico del problema se utilizará el método de muestreo Latin Hypercube, u otro similar. Las variables aleatorias que serán incluidas en dicha simulación se indican seguidamente:

Resistencia a la compresión uniaxial y parámetro  $m_i$  de la roca- GSI- Radio de la excavación- Peso unitario de la roca- Cobertura sobre el túnel- Resistencia a la compresión del concreto proyectado- Espesor nominal de concreto proyectado- Sobre-espesor de concreto proyectado resultante de la sobre excavación- Separación entre costillas y, para los casos correspondientes a túneles profundos- Convergencia inicial ( $u_0$ ) función de la distancia de colocación del soporte primario desde el frente de excavación, según indica el criterio de Corbetta (1991) u otro similar.

En los casos de túneles profundos, para la línea característica de la cavidad se usarán preferiblemente la formulación de Hoek y Brown (1983) o la modificada por Torres-Carranza (1999) las cuales hacen referencia al criterio de resistencia de Hoek y Brown, así como cualquier otra similar de razonable aceptabilidad, como por ejemplo la de Duncan (1993), la cual hace referencia al criterio de resistencia de Mohr y Coulomb.

A partir de los resultados de la simulación se determinarán los Valores Medios, Desviaciones Estándar, Coeficientes de Variación y los Valores asociados al 15 y al 85 Percentil correspondientes a las Variables Aleatorias Dependientes: Presión sobre el soporte, Capacidad menos Demanda, así como las otras variables asociadas a la definición de la Clase de comportamiento de la excavación.

En la función de distribución de la variable aleatoria Margen de Seguridad igual a la Capacidad menos la Demanda (C-D), la probabilidad de falla es la que corresponde al valor cero y esta probabilidad será acotada en el diseño de hasta máximo el 1%. El Índice de Confiabilidad del Soporte ( $\beta$ ) será definido a partir del valor medio y de la desviación estándar de dicha variable y su valor será de mínimo 2.

La resistencia a la compresión uniaxial, el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson del concreto proyectado fresco (por ejemplo a los 3 días), quedarán preferencialmente definidos por el resultado de los ensayos específicos realizados para tal fin, conforme a la Norma ASTM C 469-94 sobre núcleos de 6" de diámetro extraídos de acuerdo a la Norma ASTM C 42-94.

## 5.2 Revestimiento Definitivo

El análisis estructural del revestimiento final será realizado a partir de los Valores Medios y Desviaciones Estándar de las variables geomecánicas aleatorias independientes: "GSI", " $\sigma_{ci}$ " y " $m_i$ ".

La presión característica sobre el revestimiento se determinará mediante procedimientos probabilísticos, y su valor corresponderá al asociado a una probabilidad de no ser excedida del 95%.

Se considerará en el análisis, la vulnerabilidad ante la Acción Sísmica en aquellos sectores del túnel donde la cobertura vertical o lateral sea igual o menor que el ancho de la excavación (b) o del sólido de cargas (B), según sea  $GSI \geq 25$  o  $GSI < 25$ .

Para coberturas verticales o laterales superiores, se incluirá oportunamente en el análisis dicha acción, solamente cuando por razones geológicas sea expresamente indicado.

El coeficiente de reacción característico del macizo rocoso será determinado mediante procedimientos probabilísticos y su valor corresponderá al asociado a una probabilidad de no ser excedida del 95%, siguiendo la fórmula:

$$k = E_m(1 + \nu) / R_o$$

El Estado Límite de Agotamiento Resistente se evaluará para la siguiente combinación de las Acciones:

$$U = 1.2 * PP + 1.3 * CB$$

Siendo PP el Peso Propio y CB la Carga de Bóveda.

Para los túneles superficiales, así como para aquellas eventuales secciones profundas en condiciones geológicas especialmente críticas, se aplicará además la combinación que incluye la acción sísmica (SU):

$$U = PP + CB + SU$$

Mientras finalmente, cuando eventualmente lo indique explícitamente el modelo de análisis que se adopte en cada caso específico, según comentado a propósito de la sectorización por rango de cargas, en los casos superficiales e intermedios se aplicarán las combinaciones que incluyen también a la Carga de Hastiales (CH):

$$\begin{aligned} U1 &= 1.2 * PP + 1.3 * CB + 1.3 * CH \\ U2 &= 1.2 * PP + 1.3 * CB + 0.8 * CH \\ U3 &= 0.9 * PP + 0.8 * CB + 1.3 * CH \\ U4 &= 1 * PP + 1 * CB + 1 * CH + SU \end{aligned}$$

## 6. Procedimientos de retroalimentación del proyecto

Se anexa un diagrama funcional en el que se resume el procedimiento a seguir durante la construcción con el objeto de aplicar los controles y los inevitables ajustes al proyecto para garantizar la seguridad y la economía de la obra.

Debe enfatizarse que el proyecto de un túnel puede definirse completamente solamente al momento de la construcción ya que hasta tanto esta no se produzca, el diseño constituye un dato preliminar a ser verificado y ajustado a la realidad.

En este orden de ideas, será oportuno diseñar los soportes para toda la gama de circunstancias geomecánicas razonablemente previsibles, dejando en tales diseños unos rangos razonables de variaciones para los parámetros fundamentales (espesor de concreto proyectado, separación entre costillas, densidad de pernos, etc.) que deberán ser definidos cada vez en el campo sobre la base de índices predefinidos para tal fin (por ejemplo: el GSI para las secciones superficiales, o el índice de competencia para las secciones profundas).

En efectos, aunque tanto la necesidad así como la definición de tipología y cantidad de las intervenciones de soporte y consolidación de la excavación, se podrán detallar solamente en fase constructiva mediante la atenta observación y el constante monitoreo del comportamiento efectivo de la cavidad, existe sin embargo la necesidad de predecir los posibles escenarios (las clases de comportamiento de la excavación) a encontrar a lo largo del túnel por excavar, a partir de los iniciales conocimientos que se puedan tener sobre las circunstancias específicas de ejecución de las obras y sobre la geomecánica que caracterizará a las mismas.

A tal fin, para cada una de las clases de comportamiento de la excavación previamente definidas, es útil y necesario identificar además de sus elementos “caracterizantes-definitorios” y sus elementos “determinantes-discriminatorios” los cuales serán evidentes y/o observables durante el proceso constructivo, también aquellos elementos que puedan considerarse en alguna medida como “concomitantes-asociados”, aunque no necesariamente definitorios o discriminatorios por sí mismos, que pero puedan ser estimados antes de la ejecución material de las excavaciones, o sea en las etapas del proyecto.

En este orden de ideas, partiendo de la definición y descripción de cada una de las clases de comportamiento de la excavación, se puede eventualmente deducir que sus fundamentales elementos “definitorios” son la estabilidad del frente y de la cavidad y que sus principales elementos “discriminatorios” los constituyen las deformaciones del frente y de la cavidad, así como la extensión de la plastificación.

Finalmente, estos elementos definitorios y discriminatorios están a su vez ciertamente relacionados con todo un conjunto de elementos “asociados”, tale como por ejemplo: la competencia geomecánica del macizo rocoso (en primera aproximación la resistencia de los materiales rocosos  $m_i - \sigma_{ci}$  y la macro-estructura del macizo rocoso **GSI**) y su relación con el estado de sollicitaciones naturales (la

cobertura  $\gamma H$  en primera aproximación) o sea, aún mas en síntesis, el antes definido Índice de competencia de la excavación (función de :  $m_i - \sigma_{ci} - GSI - \gamma - H$ ):

$$IC = \sigma_{cm} / \gamma H = (0.0034 m_i^{0.8}) \sigma_{ci} \{1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_i)}\}^{GSI} / \gamma H$$

Este procedimiento expeditivo para determinar la clase de comportamiento de la excavación, eficiente esencialmente para las secciones clasificables en condiciones de cobertura profunda, ha sido recientemente propuesto por Hoek y Marinos (2001), de acuerdo con el gráfico incluido en la figura anexa, ya anteriormente comentada.

Para las secciones clasificables en condiciones de cobertura superficial o intermedia en cambio, el parámetro mas directamente “asociable” a la clase de comportamiento de la excavación, es ciertamente el ya ilustrado GSI de Hoek.

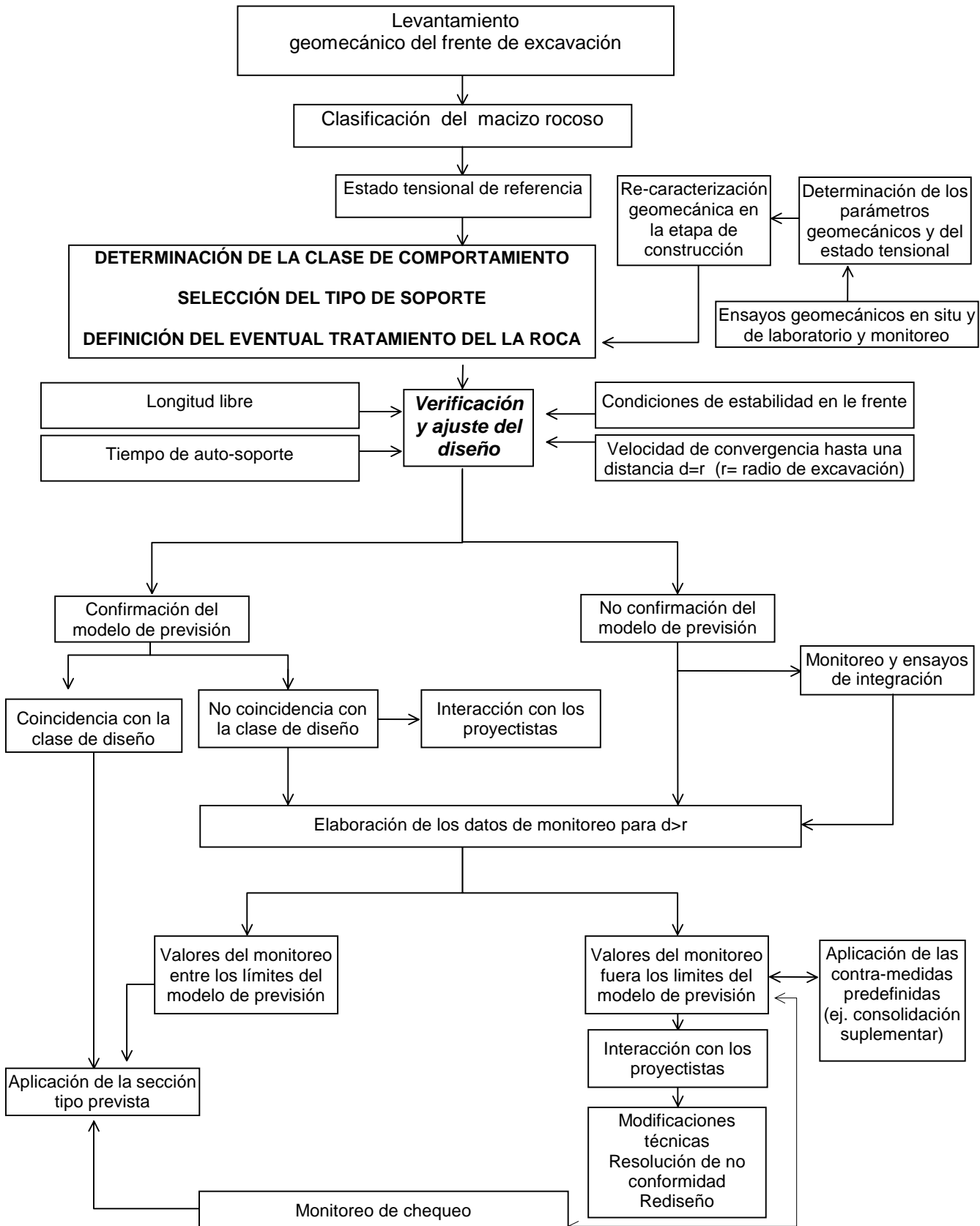
A tales efectos, en primera aproximación puede hacerse referencia a los rangos resumidos en la tabla siguiente:

<i>Clases de Comportamiento de la Excavación</i>						
Lunardi		<b>A</b>	<b>B</b>		<b>C</b>	
Hoek y Marinos		A	B	C	D E	
Russo y Otros		a-b	c	d	e f	
<b>Secciones Profundas</b>	<i>Convergencia</i>	$\epsilon < 1$	$(1 < \epsilon < 2.5)$	$(2.5 < \epsilon < 5)$	$(5 < \epsilon < 10)$	$\epsilon > 10$
	<i>Índice de Competencia</i>	$IC > 0.45$	$(0.45 > IC > 0.3)$	$(0.3 > IC > 0.2)$	$(0.2 > IC > 0.15)$	$IC < 0.15$
	<i>Radio Plástico</i>	$R_p/R_o = 1$	$(1 < R_p/R_o < 2)$	$(2 < R_p/R_o < 4)$	$R_p/R_o > 4$	$R_p/R_o \gg 4$
<b>Secciones Superficiales e Intermedias</b>		$GSI \gg 50$	$GSI > 50$	$50 > GSI > 30$	$30 > GSI > 15$	$GSI < 15$

En cuanto finalmente se refiere al proyecto del revestimiento definitivo, el diseño inicial deberá esencialmente definir su geometría (espesor) a objeto de fijar la geometría de la sección de excavación, mientras solamente después que la excavación se haya ejecutado y las condiciones geomecánicas hayan podido ser reconocidas suficientemente, se podrá definir en su totalidad la estructura a construir (la curvatura del arco invertido, la eventual armadura del concreto y, eventualmente, el tipo mismo de concreto a aplicar en cada sección de diseño).

A tales fines se suministrará a los responsables del proyecto estructurales del revestimiento, una detallada retroalimentación geomecánica del túnel excavado, incluyendo en ella todos los datos e informaciones necesarias y útiles para la definición y optimización del proyecto, recabadas a través del proceso de seguimiento descrito en el diagrama ya referido.

# RETROALIMENTACIÓN DEL DISEÑO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN



## Apéndice 1

### DETERMINACIÓN EN OBRA DE LA CLASE DE EXCAVACIÓN

Una lectura correcta y mas atenta de la tabla resumen presentada para la “Clase de comportamiento” de la excavación y su relación con el **GSI** y el **IC**, indica que desde un punto de vista practico, la determinación en el campo en el frente de excavación de la clase de comportamiento, bien puede en primera aproximación concretarse con la estimación de los dos índices **GSI** e **IC** y luego aplicar la tabla reportada a continuación, la cual implícitamente verifica la contemporaneidad de ambas condiciones:

1. La relativa a la calidad geomecánica del macizo rocoso (esto es en este caso el **GSI**), la cual adquiere carácter discriminatorio preponderante para las condiciones de superficialidad de la sección del túnel en referencia, aunque debe también ser verificada y aplicada para las condiciones profundas.
2. La relativa a la interacción entre tal calidad geomecánica integral del terreno (**GSI - m<sub>i</sub> - σ<sub>ci</sub>**) y las sollicitaciones geostaticas (**γH**) presentes (esto es en este caso el **IC**), la cual adquiere carácter discriminatorio preponderante para las condiciones de profundidad de la sección del túnel en referencia.

<b>Clase de Comportamiento de la Excavación</b>						
<b>GSI</b>	<b>IC</b>	<i>&lt; 0.15</i>	<i>0.15 - 0.20</i>	<i>0.20 - 0.30</i>	<i>0.30 - 0.45</i>	<i>&gt; 0.45</i>
	<i>&lt;15</i>	<b>f</b>	<b>f</b>	<b>f</b>	<b>f</b>	<b>f</b>
	<i>15 - 25</i>	<b>f</b>	<b>e</b>	<b>e</b>	<b>e</b>	<b>e</b>
	<i>25 - 40</i>	<b>f</b>	<b>e</b>	<b>d</b>	<b>d</b>	<b>d</b>
	<i>40 - 60</i>	<b>f</b>	<b>e</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>c</b>
	<i>&gt;60</i>	<b>f</b>	<b>e</b>	<b>d</b>	<b>c</b>	<b>a/b</b>

Efectivamente debe recordarse que la determinación del **IC** ( $\sigma_{cm}/\gamma H$ ) requiere, para estimar la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso ( $\sigma_{cm}$ ), además que de la estimación del **GSI**, también de la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ) y del parametro (**m<sub>i</sub>**) igualmente relativo a la roca intacta; finalmente requiere del conocimiento de la cobertura de la seccion (**H**) y del peso unitario del macizo rocoso (**γ**):

**GSI** se determina en el frente de excavación;  $\sigma_{ci}$  se determina en laboratorio, o se estima en el frente de excavación ; **m<sub>i</sub>** se estima en el frente de excavación, o se determina en laboratorio; **H** se deduce de los planos topograficos ; **γ** se asume en campo, o se determina en laboratorio.

Se anexa finalmente una tabla integral, la cual facilita estimar la clase de comportamiento de la excavación en función de los parámetros realmente primarios e independientes: el **GSI** el **m<sub>i</sub>** y la relación (**H/σ<sub>ci</sub>**). Esta tabla ha sido obtenida asumiendo para el peso unitario un valor medio de 2.5 (t/m<sup>3</sup>).

CLASE DE COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACION EN FUNCION DE: GSI - H -  $\sigma_{ci}$

G.Perri, 2002

H/ $\sigma_{ci}$ (m/MPa)		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	28	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	
	mi	INDICE DE COMPETENCIA (IC = $\sigma_{cm}/\gamma H$ )																												
GSI < 15  (calculo 10)	5	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	7,5	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	10	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	15	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	20	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	25	0,35	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	30	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	35	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
GSI =(15-25)  (calculo 20)	5	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
	7,5	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	f	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	
	10	0,26	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	
	15	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	
	20	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
	25	0,47	0,41	0,37	0,33	e	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	
	30	0,54	0,47	0,42	0,38	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	
	35	0,60	0,53	0,47	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
GSI =(25-40)  (calculo 32)	5	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	
	7,5	0,36	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	
	10	0,41	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
	15	0,51	0,45	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	
	20	0,60	0,53	0,47	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
	25	0,69	0,60	0,54	0,48	0,44	0,40	0,37	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,21	0,19	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	
	30	0,78	0,68	0,60	0,54	0,49	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34	d	0,30	0,29	0,27	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	
	35	0,87	0,76	0,67	0,61	0,55	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	
GSI =(40-60)  (calculo 50)	5	0,61	0,53	0,48	0,43	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
	7,5	0,72	0,63	0,56	0,50	0,46	0,42	0,39	0,36	0,34	0,31	0,30	0,28	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	
	10	0,80	0,70	0,62	0,56	0,51	0,47	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	0,31	0,29	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,04	
	15	0,93	0,81	0,72	0,65	0,59	0,54	0,50	0,46	0,43	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	
	20	1,05	0,92	0,82	0,74	0,67	0,61	0,57	0,53	c	0,46	0,43	0,41	0,39	0,37	0,33	0,29	0,27	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	
	25	1,18	1,03	0,92	0,82	0,75	0,69	0,63	0,59	0,55	0,51	0,48	0,46	0,43	0,41	0,37	0,33	0,30	0,27	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	
	30	1,31	1,15	1,02	0,92	0,83	0,76	0,71	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,41	0,37	0,33	0,31	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,07	
	35	1,45	1,27	1,13	1,01	0,92	0,84	0,78	0,72	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,29	0,25	0,23	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	
GSI > 60  (calculo 70)	5	1,45	1,27	1,13	1,02	0,92	0,85	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,29	0,25	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,08	
	7,5	1,60	1,40	1,25	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	
	10	1,69	1,48	1,31	1,18	1,08	0,99	0,91	0,85	0,79	0,74	0,70	0,66	0,62	0,59	0,53	0,47	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,09	
	15	1,83	1,60	1,42	1,28	1,17	1,07	0,99	0,92	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43	0,37	0,32	0,28	0,26	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,10	
	20	1,99	1,74	1,55	1,39	1,26	1,16	1,07	0,99	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73	0,70	a/b	0,56	0,51	0,46	0,40	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,11	
	25	2,17	1,90	1,69	1,52	1,38	1,27	1,17	1,08	1,01	0,95	0,89	0,84	0,80	0,76	0,68	0,61	0,55	0,51	0,43	0,38	0,34	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,12	
	30	2,38	2,08	1,85	1,66	1,51	1,39	1,28	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,88	0,83	0,74	0,67	0,60	0,55	0,48	0,42	0,37	0,33	0,28	0,24	0,21	0,18	0,17	0,13	
	35	2,60	2,28	2,02	1,82	1,65	1,52	1,40	1,30	1,21	1,14	1,07	1,01	0,96	0,91	0,81	0,73	0,66	0,61	0,52	0,46	0,40	0,36	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	

CLASE DE COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACION EN FUNCION DE: GSI - H -  $\sigma_{ci}$

G.Perri, 2002

H/ $\sigma_{ci}$ (m/MPa)		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	28	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	
	mi	INDICE DE COMPETENCIA (IC = $\sigma_{cm}/\gamma H$ )																												
GSI < 15  (calculo 10)	5	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	7,5	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	10	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	15	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	20	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	25	0,35	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	30	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	35	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
GSI =(15-30)  (calculo 22)	5	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
	7,5	0,23	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	
	10	0,28	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	
	15	0,36	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	
	20	0,43	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
	25	0,50	0,44	0,39	0,35	e	0,29	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	
	30	0,57	0,50	0,44	0,40	0,36	0,33	0,31	0,28	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	
	35	0,64	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,34	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	
GSI = (30-50)  (calculo 40)	5	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03		
	7,5	0,48	0,42	0,38	0,34	0,31	0,28	0,26	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03		
	10	0,55	0,48	0,43	0,38	0,35	0,32	0,30	0,27	0,26	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04		
	15	0,66	0,58	0,51	0,46	0,42	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,23	0,21	0,18	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	
	20	0,76	0,67	0,59	0,53	0,49	0,45	0,41	0,38	0,36	0,33	0,31	0,30	0,28	0,27	0,24	0,21	0,19	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	
	25	0,87	0,76	0,67	0,61	0,55	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	
	30	0,97	0,85	0,76	0,68	0,62	0,57	0,52	0,49	0,45	0,43	d	0,38	0,36	0,34	0,30	0,27	0,25	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,05	
	35	1,08	0,94	0,84	0,76	0,69	0,63	0,58	0,54	0,50	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38	0,34	0,30	0,27	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	
GSI > 50  (calculo 60)	5	0,94	0,82	0,73	0,66	0,60	0,55	0,51	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07		
	7,5	1,07	0,94	0,83	0,75	0,68	0,63	0,58	0,54	0,50	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08		
	10	1,16	1,02	0,90	0,81	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43	0,41	0,36	0,33	0,30	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08		
	15	1,30	1,14	1,01	0,91	0,83	0,76	0,70	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,41	0,36	0,33	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09		
	20	1,44	1,26	1,12	1,01	0,92	0,84	0,78	0,72	c	0,63	0,59	0,56	0,53	0,51	0,45	0,40	0,37	0,34	0,29	0,25	0,22	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10		
	25	1,60	1,40	1,24	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11		
	30	1,76	1,54	1,37	1,23	1,12	1,03	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69	0,65	0,62	0,55	0,49	0,45	0,41	0,35	0,31	0,27	0,25	0,21	0,18	0,15	0,14	0,12		
	35	1,94	1,70	1,51	1,36	1,23	1,13	1,04	0,97	0,91	0,85	0,80	0,75	0,71	0,68	0,60	0,54	0,49	0,45	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14		
GSI >> 50  (calculo 70)	5	1,45	1,27	1,13	1,02	0,92	0,85	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,29	0,25	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10		
	7,5	1,60	1,40	1,25	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11		
	10	1,69	1,48	1,31	1,18	1,08	0,99	0,91	0,85	0,79	0,74	0,70	0,66	0,62	0,59	0,53	0,47	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12		
	15	1,83	1,60	1,42	1,28	1,17	1,07	0,99	0,92	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43	0,37	0,32	0,28	0,26	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13		
	20	1,99	1,74	1,55	1,39	1,26	1,16	a/b	0,99	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73	0,70	0,62	0,56	0,51	0,46	0,40	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14		
	25	2,17	1,90	1,69	1,52	1,38	1,27	1,17	1,08	1,01	0,95	0,89	0,84	0,80	0,76	0,68	0,61	0,55	0,51	0,43	0,38	0,34	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15		
	30	2,38	2,08	1,85	1,66	1,51	1,39	1,28	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,88	0,83	0,74	0,67	0,60	0,55	0,48	0,42	0,37	0,33	0,28	0,24	0,21	0,18	0,17		
	35	2,60	2,28	2,02	1,82	1,65	1,52	1,40	1,30	1,21	1,14	1,07	1,01	0,96	0,91	0,81	0,73	0,66	0,61	0,52	0,46	0,40	0,36	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18		

CLASE DE COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACION EN FUNCION DE: GSI - H -  $\sigma_{ci}$

G.Perrí, 2002

H/ $\sigma_{ci}$ (m/MPa)		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	28	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	
	mi	INDICE DE COMPETENCIA (IC = $\sigma_{cm}/\gamma H$ )																												
GSI < 15  (calculo 10)	5	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	7,5	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	10	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	15	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	20	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	25	0,35	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	30	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	35	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
GSI =(15-25)  (calculo 20)	5	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
	7,5	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
	10	0,26	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	
	15	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	
	20	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
	25	0,47	0,41	0,37	0,33	e	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	
	30	0,54	0,47	0,42	0,38	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	
	35	0,60	0,53	0,47	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
GSI =(25-50)  (calculo 37)	5	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	
	7,5	0,36	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	
	10	0,41	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
	15	0,51	0,45	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	
	20	0,60	0,53	0,47	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
	25	0,69	0,60	0,54	0,48	0,44	0,40	0,37	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,21	0,19	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	
	30	0,78	0,68	0,60	0,54	0,49	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34	d	0,30	0,29	0,27	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	
	35	0,87	0,76	0,67	0,61	0,55	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	
GSI =(50-70)  (calculo 60)	5	0,61	0,53	0,48	0,43	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	
	7,5	0,72	0,63	0,56	0,50	0,46	0,42	0,39	0,36	0,34	0,31	0,30	0,28	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	
	10	0,80	0,70	0,62	0,56	0,51	0,47	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	0,31	0,29	0,28	0,25	0,22	0,20	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,04	
	15	0,93	0,81	0,72	0,65	0,59	0,54	0,50	0,46	0,43	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	
	20	1,05	0,92	0,82	0,74	0,67	0,61	0,57	0,53	c	0,46	0,43	0,41	0,39	0,37	0,33	0,29	0,27	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	
	25	1,18	1,03	0,92	0,82	0,75	0,69	0,63	0,59	0,55	0,51	0,48	0,46	0,43	0,41	0,37	0,33	0,30	0,27	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	
	30	1,31	1,15	1,02	0,92	0,83	0,76	0,71	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,41	0,37	0,33	0,31	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,07	
	35	1,45	1,27	1,13	1,01	0,92	0,84	0,78	0,72	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,29	0,25	0,23	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	
GSI > 70  (calculo 80)	5	1,45	1,27	1,13	1,02	0,92	0,85	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,45	0,41	0,37	0,34	0,29	0,25	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,08	
	7,5	1,60	1,40	1,25	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	
	10	1,69	1,48	1,31	1,18	1,08	0,99	0,91	0,85	0,79	0,74	0,70	0,66	0,62	0,59	0,53	0,47	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,09	
	15	1,83	1,60	1,42	1,28	1,17	1,07	0,99	0,92	0,85	0,80	0,75	0,71	0,67	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43	0,37	0,32	0,28	0,26	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,10	
	20	1,99	1,74	1,55	1,39	1,26	1,16	1,07	0,99	0,93	0,87	0,82	0,77	0,73	0,70	a/b	0,56	0,51	0,46	0,40	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,11	
	25	2,17	1,90	1,69	1,52	1,38	1,27	1,17	1,08	1,01	0,95	0,89	0,84	0,80	0,76	0,68	0,61	0,55	0,51	0,43	0,38	0,34	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,12	
	30	2,38	2,08	1,85	1,66	1,51	1,39	1,28	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,88	0,83	0,74	0,67	0,60	0,55	0,48	0,42	0,37	0,33	0,28	0,24	0,21	0,18	0,17	0,13	
	35	2,60	2,28	2,02	1,82	1,65	1,52	1,40	1,30	1,21	1,14	1,07	1,01	0,96	0,91	0,81	0,73	0,66	0,61	0,52	0,46	0,40	0,36	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	

## ***BIBLIOGRAFÍA***

Hoek, E., Carranza-Torres C., & Corkum B. **2002** Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition. *Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting*.

Marinos, P. and Hoek, E. **2001** Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*.

Lunardi, P. **2001** Progetto e Costruzione de Gallerie. *Quarry and Construction*.

Hoek, E. and Marinos, P. **2000** Predicting Tunnel Squeezing. *Tunnels and Tunnelling International. Part 1 November 2000, Part 2 December 2000*.

Truzman, M. **2000** Determinación del Índice de Resistencia Geológico (GSI) en Rocas Metamórficas de la Cordillera de la Costa Venezolana. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (78)*

Perri, G. **1999** Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (75)*

Perri, G. **1998** Geomecánica de Túneles: Una visión pragmática. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia (74)*

Russo, G., Kalamaras, G.S. & Grasso, P. **1998** A discussion on the concepts of Geomechanical Classes, Behaviour Categories and Technical Classes for an Underground Project. *Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo (54)*.

Hoek, E., & Brown, E.T. **1997** Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Mining Sc. & Geomechanics Abstracts (34)*.

Hoek, E., & Brown, E.T. **1980** Underground Excavation in Rock. *London- Instit. Min. Metall.*