

CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA DE LOS MACIZOS ROCOSOS Y USO DEL GSI PARA EVALUAR LAS CARGAS SOBRE EL SOPORTE DE TÚNELES POCO PROFUNDOS EXCAVADOS EN ROCAS

Gianfranco Perri Ingeniero Consultor, Profesor de “Diseño Geotécnico de Túneles” en la Universidad Central de Venezuela

Resumen

Se resumen las recomendaciones de la Asociación Francesa de Trabajos en Subterráneo (AFTES) para el cálculo de las presiones verticales actuantes sobre el soporte de un túnel, basadas en la teoría del “sólido de cargas” y se comentan los inconvenientes ligados al uso del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para la solución de problemas de ingeniería de rocas, debido a las dificultades teóricas y prácticas de definir los parámetros de resistencia al corte (c y ϕ) para los macizos rocosos, generalmente muy heterogéneos. Se presenta la versión actualizada del criterio de resistencia de Hoek-Brown para macizos rocosos con la estima de sus parámetros básicos (m y s) por medio del índice de calidad geomecánica del macizo (GSI). Basado en la formulación original de la AFTES y en el nuevo índice (GSI), se propone una fórmula y correspondiente gráfico para el cálculo de la altura del sólido de cargas en túneles poco profundos excavados en rocas y finalmente, se introduce el concepto de GSI residual, comentando su posible estimación numérica y su uso práctico.

Introducción

Constituye práctica generalizada el calcular la carga vertical actuante sobre el soporte de los túneles subsuperficiales, mediante la metodología denominada del “sólido de cargas”, según la cual se evalúa la altura (H_p) del volumen de terreno suprayacente al techo del túnel que se considera gravite totalmente sobre el soporte, siendo por lo tanto el peso de tal volumen el responsable directo de la presencia y magnitud de las presiones verticales actuantes (γH_p), con (γ) peso unitario del terreno contenido en el “sólido de cargas” (figura 1).

En realidad tal metodología de cálculo ha sido también aplicada a túneles profundos siguiendo varias formulaciones (ejemplo Terzaghi 1946 y Protodyakonof 1960), aunque generalmente se admite que es más oportuno, para estos casos, recurrir al uso de metodologías de análisis y cálculo que toman en cuenta la redistribución de esfuerzos y deformaciones alrededor de la cavidad, analizando la estabilidad de esta en función de las características geomecánicas de resistencia y deformación de los terrenos afectados por la excavación (por ejemplo, el método de las líneas características, también denominado de convergencias – confinamientos).

La AFTES (Asociación Francesa de Trabajos en Subterráneo, 1988) propone aplicar la metodología del “sólido de cargas” solamente hasta tanto la cobertura del túnel sea inferior a 2.5 veces el ancho (b) del “sólido de cargas” y, en cuanto a la evaluación de la altura (H_p) de tal “sólido de cargas”, propone que esta sea igual a la cobertura (H) del túnel hasta tanto esta sea inferior al ancho (b) del “sólido de cargas”, luego para coberturas ($b < H < 2.5b$) intermedias, propone calcular (H_p) en función de las dimensiones de la sección de excavación (ancho B y altura H_t) y de las características geomecánicas, cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ), de los terrenos en que se realiza la excavación.

Esta diferenciación parte de la constatación del hecho que cuando las coberturas son muy limitadas, es improbable que se desarrolle el fenómeno conocido como “efecto arco” según el cual, debido a la fricción y consecuente resistencia al corte entre las partículas constituyente el medio suprayacente al túnel y a consecuencia del inevitable asentamiento del terreno en el techo de la excavación, se produce el autosostenimiento del terreno suprayacente a una superficie arqueada, cuya forma y distancia del techo de la excavación varían en función de la geometría del problema, de las características geotécnicas de los terrenos y del procedimiento constructivo empleado.

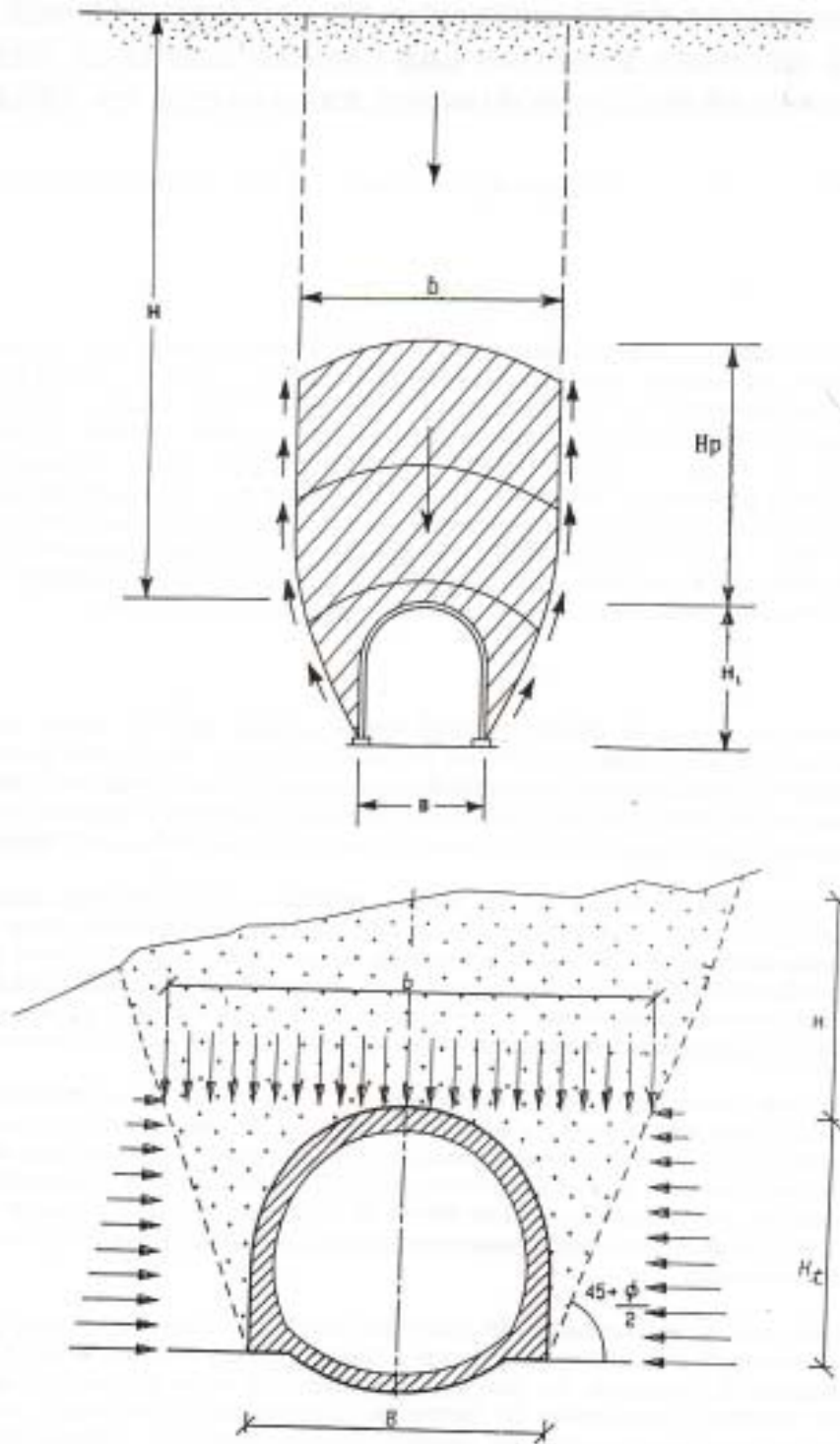


FIGURA N. 1

Terzaghi (1946) había propuesto no tomar en cuenta la posibilidad de un “efecto arco” hasta coberturas inferiores a 1.5 veces (B+Ht): una hipótesis esta que por lo general resulta ser algo mas conservadora de la que luego ha sido propuesta, como se ha comentado antes, por la AFTES.

En síntesis, la AFTES propone las siguientes fórmulas:

$H_p=H$, para coberturas menores al ancho del sólido de cargas ($H<b$) y, para coberturas intermedias ($b<H<2.5 b$), la altura de cargas debe ser la que resulte mayor entre $H_p=b$ y $H_p = (b - 2c/\gamma)(1 - e^{-2H \operatorname{tg} \phi/b}) / 2 \operatorname{tg} \phi$, para túneles excavados en suelos y debe ser igual a $H_p=\alpha(B+H)$, para túneles excavados en rocas, siendo (α) un coeficiente empírico función del ángulo de fricción del macizo rocoso (figura 2) y con $b=B+2H, \operatorname{tg}(45-\phi/2)$.

A veces, se sugiere aplicar la fórmula indicada para los suelos, al caso de rocas de muy bajas características geomecánicas, como por ejemplo los macizos rocosos pertenecientes a la Clase V de la Clasificación Geomecánica de Bieniawski. Finalmente, para coberturas elevadas ($H>2.5b$), la fórmula general tiende hacia su límite superior: $H_p=(b-2c/\gamma)/2\operatorname{tg}\phi$, (para $\phi \neq 0$) y, $H_p=H(1-2c/\gamma b)$, (para $\phi = 0$).

Criterio de Hoek-Brown

Ahora bien, es muy conocida y reconocida la dificultad práctica y conceptual de obtener o estimar y hasta definir los parámetros de resistencia al corte (c y ϕ) cuando el medio al que se refieren es un macizo rocoso, por antonomasia heterogéneo, anisotrópico y discontinuo.

En efectos, con el desarrollarse de la mecánica de rocas se revelaron prontamente los fuertes límites del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb basado en el uso de (c) y (ϕ), cuando se trató de aplicarlo ya no solo al cálculo de la resistencia al corte del material rocoso o de planos de discontinuidades definidas, sino al macizo rocoso en su conjunto, así como resultaba necesario en un gran número de problemas prácticos en los que el comportamiento mecánico del macizo no resultaba directamente controlado ni por planos específicos de discontinuidades ni por la resistencia al corte intrínseca a los materiales rocosos constituyente el macizo, sino por la resistencia media global del conjunto constituido por los materiales rocosos, las discontinuidades, los eventuales fisuras, la geometría relativa de la macroestructura del medio discontinuo, entre otros.

Surgieron entonces las preguntas siguientes:

¿Cuáles son y como se determinan los parámetros (c) y (ϕ) del macizo rocoso heterogéneo y discontinuo?

¿Son iguales a los de los materiales rocosos constituyentes el macizo?

¿O son iguales a los de las discontinuidades presentes? (¿A los valores picos, o a los residuales?)

¿O se debe hacer la media entre los parámetros de los diferentes materiales presentes y de las discontinuidades?

¿Pero se hará una media ponderada? (¿y según cual ponderación?)

¿Se determinarán con ensayos en laboratorio o en sitio?

¿Y luego finalmente, como se pasará de los valores de ensayo a los parámetros del macizo, que son en definitiva los que requiere el ingeniero proyectista?

En este contexto, la introducción del criterio de resistencia de Hoek (1980) para rocas y macizos rocosos, ha producido un gran salto cualitativo en la ingeniería de rocas, al permitir este desvincularse finalmente del uso (impuesto por la falta de alternativas prácticas valederas) del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb el cual, habiendo sido rígidamente trasladado de la mecánica de suelos a la mecánica de rocas, obligaba a la adopción de parámetros de resistencia al corte (c y ϕ), supuestamente representativos también del nuevo medio: el macizo rocoso.

El criterio de Hoek-Brown introduce parámetros de resistencia al corte propios, sea del material rocoso (la resistencia a la compresión uniaxial C_0 y el parámetro de Hoek para la roca intacta m_i), sea del macizo rocoso (m_b) y (s) a través del índice GSI (Geological Strength Index).

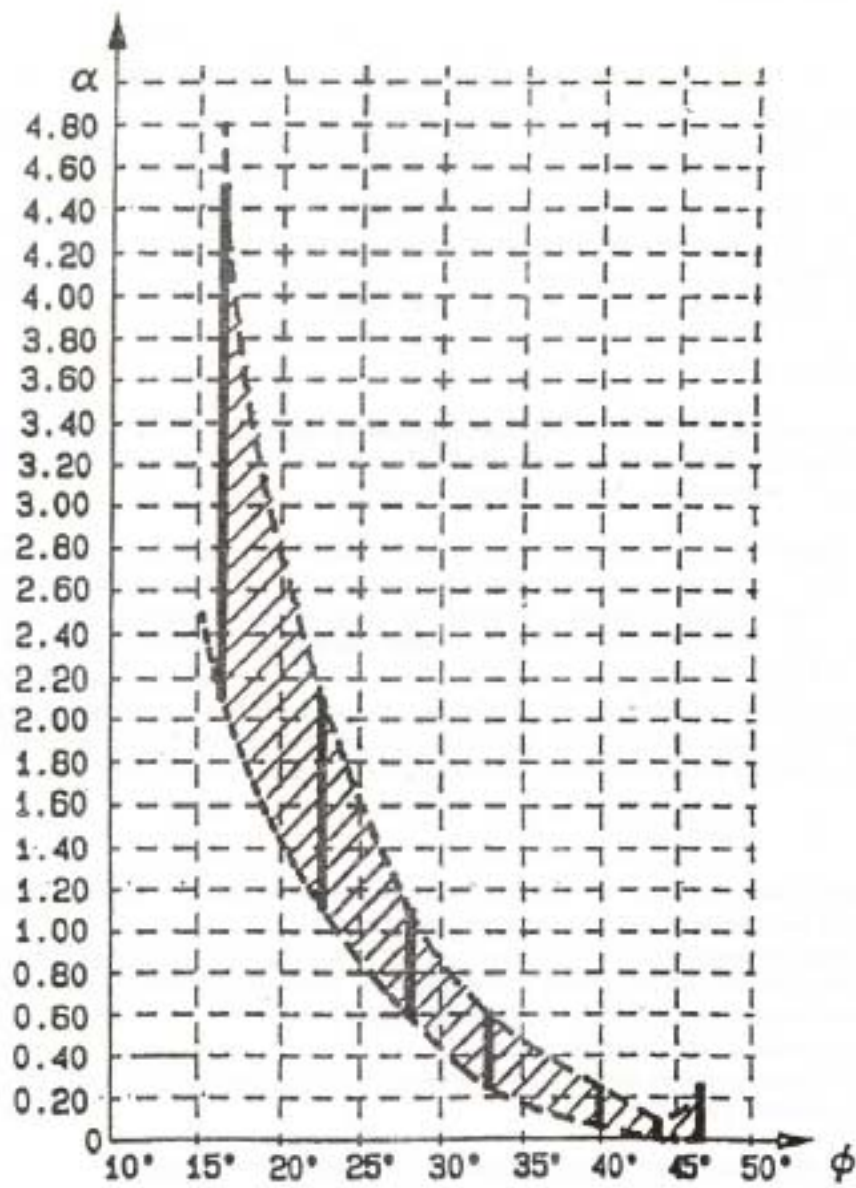


FIGURA N. 2

Según la versión actual del criterio de resistencia de Hoek-Brown (1997), la formulación general es la siguiente:

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

Siendo: (σ_1 y σ_3) los esfuerzos principales máximos y mínimos respectivamente (eventualmente efectivos) al momento de la rotura; (m_b) la constante de Hoek para el macizo rocoso; (s y a) las constantes de Hoek que dependen de las características geomecánicas del macizo rocoso; y (Co) la resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso.

Para el material rocoso: ($m_b = m_i$); ($s = 1$); ($a = 0.5$) y el criterio se transforma: $\sigma_1 = \sigma_3 + Co \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{Co} + 1}$

Para el macizo rocoso (cuando $GSI \geq 25$), los parámetros m_b , s y a , valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad a = 0.5$$

Para el macizo rocoso (cuando $GSI < 25$), los parámetros m_b , s y a , valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = 0 \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

La definición del Geological Strength Index (GSI) para el macizo rocoso, depende de la macroestructura del macizo rocoso (grado de fracturación) y de las condiciones de las superficies de las discontinuidades, según la mas reciente definición propuesta por Hoek (1998) reproducida en la figura 3.







Los autores del criterio sugieren, a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, estimar este a partir del RMR de Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. Russo (1998), propone estimar el GSI tambien a partir del indice Q de Barton, depurandolo del factor tensional (SRF) y asignando 1 al parárrmetro agua (Jw), obteniendo luego: **$GSI = 9 \lg Q' + 44$** .

Claro está que no todos los problemas están resueltos con la sola adopción del criterio de Hoek-Brown. Queda el problema de la selección del más representativo valor de los parámetros (Co) y (m_i) para macizos heterogéneos; el índice geomecánico (GSI) tiene algo de cualitativo y por lo tanto de subjetivo; la determinación en laboratorio del parámetro (m_i) es dificultosa: para cada material presente, según Hoek y Brown (1997), se deben realizar por lo menos 5 ensayos triaxiales sobre igual número de muestras del mismo material con presiones de celda entre 0 y el 50% del valor de Co .

Finalmente, otra dificultad señalada por los autores del criterio, es la que deriva de la todavía difundida, aunque poco justificada, práctica de emplear el criterio de Mohr-Coulomb y los supuestos parámetros (c y ϕ) asociados al macizo rocoso, como consecuencia de la difusión de software especializado que los utiliza.

Altura del solido de cargas y GSI

Un claro ejemplo de la citada practica, relativa al uso del criterio de Mohr-Coulomb para macizos rocosos, lo constituye la antes descrita metodología AFTES, propuesta para evaluar las cargas sobre el soporte de túneles poco profundos excavados en rocas.

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA		CONDICIONES DE LA SUPERFICIE				
<p>De acuerdo la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccíose el recuadro adecuado del gráfico. Estime el valor promedio del INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (IGI) a partir de los extremos. No utilice un valor preciso, es mas realista usar un rango de valores. El criterio de Hoek-Brown puede ser aplicado únicamente para masas rocosas en las cuales el tamaño individual de los bloques, es pequeño (<25%) en comparación con el tamaño de la excavación en consideración.</p>		MUY BUENA Muy rugosa, superficies finas (no meteoriz.)	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, oxidada.	REGULAR Lig. meteorización meteorizada y alterada	POBRE Périda, altamente meteorizada, recubrimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares.	MUY POBRE Périda, altamente meteorizada, con recubrimientos o rellenos de arcilla blanda.
ESTRUCTURA		DESCRIPCION DE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE				
	ROCA INTACTA O MASIVA Especímenes de roca intacta o masa rocosa masiva en sitio, con muy pocas discontinuidades y extensamente espaciadas.	80	70	N/A	N/A	N/A
	BLOQUEADA (BLOCKY) Masa rocosa muy bien trabada e imperturbada, consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales.	70	60	50	40	30
	MUY BLOQUEADA (VERY B) Masa rocosa trabada, parcialmente perturbada, con bloques angulares multifacéticos, formados por cuatro o mas sistemas de discontinuidades.	60	50	40	30	20
	BLOQUEADA/PERTURBADA Masa rocosa plegada y/o fallada, con bloques angulares formados por la intersección de muchos sistemas de discontinuidades.	50	40	30	20	10
	DESINTEGRADA Masa rocosa pobremente trabada y altamente fracturada con una mezcla de trozos de rocas angulares y redondeados.	40	30	20	10	0
	FOLIADA/LAMINADA/TECTONIZADA. Masa rocosa débil, finamente laminada o foliada y tectónicamente desplazada. Foliación fina prevalece sobre otros sistemas de discontinuidades, resultando una completa ausencia de bloques.	N/A	N/A	N/A	N/A	10

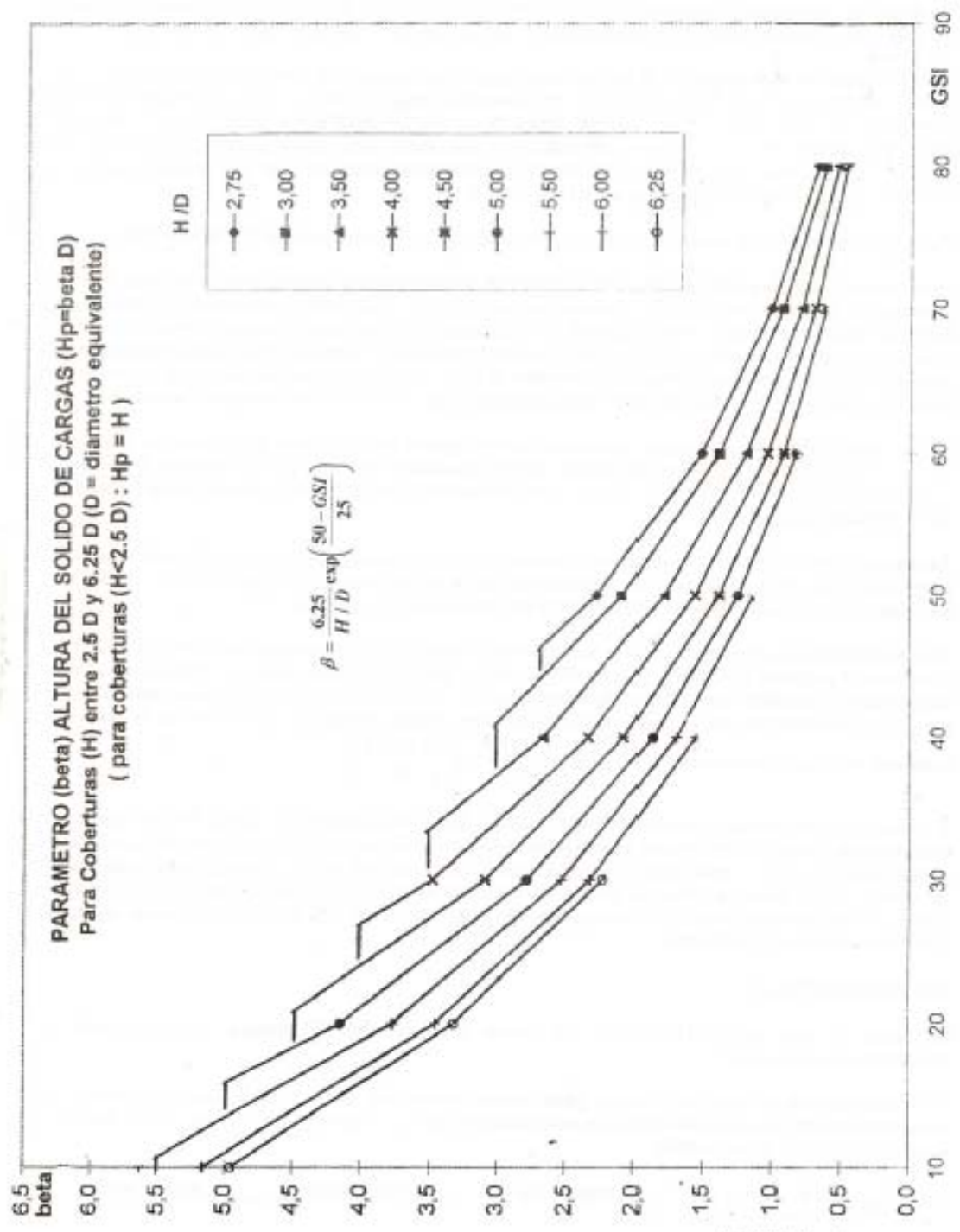


FIGURA N. 4

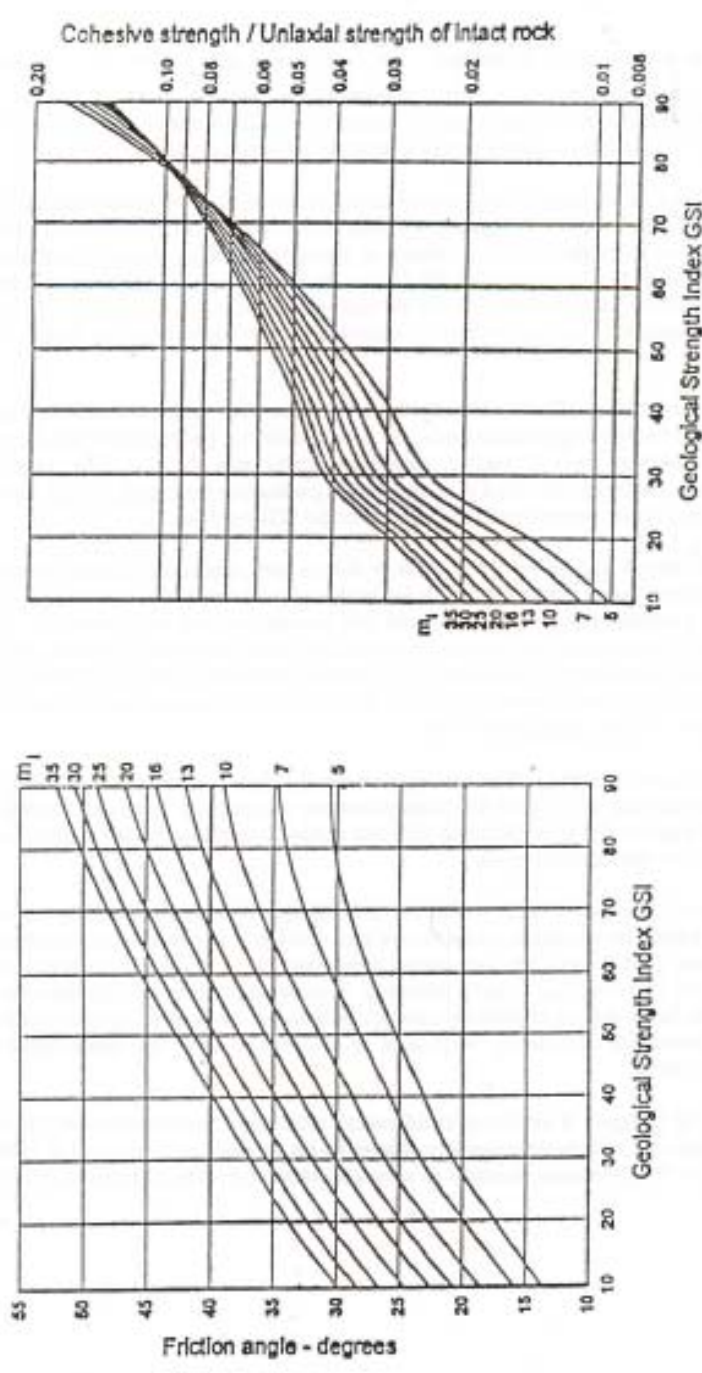


FIGURA N. 5

manteniendo inalterada la formulación del criterio: $\sigma_1 = \sigma_3 + Co\sqrt{m\sigma_3 / Co + s}$, siendo: (σ_1 y σ_3) los esfuerzos principales máximos y mínimos respectivamente al momento de la rotura; ($m - s$ y $mr - sr$) los parámetros picos y residuales de Hoek para el macizo rocoso y (mi y Co) respectivamente el parámetro de Hoek para el material rocoso y la resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso.

En el gráfico de la figura 6, se representan los parámetros originales de Hoek en función del GSI (en 1994 Hoek introdujo el Geological Strength Index y lo sustituyó al RMR en las fórmulas antes indicadas) y puede observarse que el decaimiento de los parámetros (m y s) cuando se transforman en parámetros residuales (mr y sr), se acentúa notablemente con el disminuir del valor del GSI, o sea con el disminuir de la calidad geomecánica del macizo rocoso. En particular para macizos rocosos de baja calidad geomecánica ($GSI < 25 - 30$), los valores numéricos de los parámetros residuales decaen abruptamente y probablemente en forma irrealísticamente exagerada.

Para subsanar esta incongruencia, Hoek y Brown en 1997 reconocen, aunque de manera no explícita, la inconsistencia del procedimiento originalmente indicado para calcular los parámetros residuales, al introducir el concepto de un GSI residual (para el macizo rocoso en condiciones de post falla, post rotura, o post plastificación) e implícitamente sugieren, para el cálculo de los parámetros residuales, utilizar las fórmulas de los parámetros naturales (m y s) pero sustituyendo al GSI el valor del GSI residual.

Adicionalmente, en el mismo trabajo de 1997, Hoek y Brown por intermedio de tres ejemplos relativos a macizos rocoso de optima, media y baja calidad, a los cuales asignan valores numéricos para los parámetros naturales y residuales, permiten deducir los valores del GSI residual en cada caso, resultando una relación no lineal entre GSI_{res} y GSI presentando, los valores residuales, una caída tanto más acentuada cuanto mejor es la calidad geomecánica del macizo rocoso natural: el GSI_{res} vale del orden de $2/3$ del GSI para macizos rocosos de buena calidad ($GSI > 75$), $4/5$ para macizos de calidad intermedia y se mantiene en el mismo orden ($GSI_{res} \approx GSI$) para macizos rocoso de baja calidad ($GSI < 30$).

La explicación de este nuevo resultado, debe ser buscada en el comportamiento post falla que presentan los macizo rocoso de diferente calidad: desde un comportamiento elasto frágil para una calidad optima, a un comportamiento elasto plástico con ablandamiento para una calidad intermedia, hasta un comportamiento elasto perfectamente plástico para una calidad pésima.

En el gráfico de la figura 7 se indica el GSI_{res} en función del GSI natural según deducible de los tres ejemplos de Hoek y Brown (1997) y también se indican las relaciones que valdrían si se consideraran valederas las formulas originalmente propuestas (1988) para los parámetros residuales (mr y sr): sería necesario asumir valores irracionalmente negativos para el GSI_{res} , a mayor prueba de la inconsistencia de aquellas fórmulas y de aquellos valores exageradamente bajos que se obtendrían para los parámetros residuales, especialmente para macizos rocosos de calidad geomecánica muy pobre. Se incluye en el mismo grafico la relación lineal propuesta por Russo (1998): $GSI_{res} = 0.36GSI$.

Finalmente, el gráfico de la figura 8 evidencia la diferencia entre las formulas originales (de mr y sr) y las actuales, ya que representa los valores naturales y residuales de los parámetros del criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos (1988 y 1997), tomando también en cuenta la ultima formulación propuesta, que indica asumir ($s = 0$), para $GSI < 25$.

En alternativa, se propone a continuación una metodología sencilla que permita estimar las referidas cargas a partir de la dimensión del túnel y del parámetro (GSI) del macizo rocoso en que se realiza la excavación.

El ancho (b) del sólido de cargas puede teóricamente variar de un mínimo igual al ancho del túnel (para $\phi = 90^\circ$), hasta un máximo igual a $(B+2Ht)$ para $\phi = 0^\circ$. En la práctica el ángulo de fricción podrá razonablemente variar alrededor de 35° , entre 60° y 10° , así que $(B+2Ht) \text{tg}15 < b < (B+2Ht) \text{tg}40$ con lo cual parece suficientemente aproximado un valor de $b = 2.5 D$, siendo D el diámetro equivalente de la sección del túnel. En consecuencia, los límites de cobertura (H) hasta los cuales, respectivamente, la altura (Hp) es igual a la cobertura y el método del sólido de carga es aplicable, resultan ser $2.5 D$ y $6.25 D$.

Queda por lo tanto solo por estimar la altura (Hp) del sólido de cargas para coberturas ($2.5D < H < 6.25D$).

Es interesante a este propósito observar que el fenómeno del efecto arco se acentúa, además que con la calidad geomecánica del macizo rocoso (GSI), también con el aumento de las presiones horizontales de confinamiento dentro del terreno interesado y estas presiones, por intermedio del coeficiente de empuje lateral, son a su vez proporcionales a las presiones verticales y por lo tanto en primera aproximación a la misma cobertura, o a la relación (H/D) entre cobertura y diámetro equivalente de la sección de la excavación, para así al mismo tiempo tomar en cuenta que el desarrollo del efecto arco se facilita al disminuir el ancho y la altura de la excavación.

En este mismo orden de ideas puede observarse también que el límite superior de la cobertura (H) para la aplicabilidad del método del sólido de cargas, debería igualmente disminuir con el aumentar de la calidad geomecánica (GSI) del macizo rocoso, con lo cual en efectos (así como se comentó antes) también disminuye el ancho del sólido de cargas (b).

Tomando en cuenta todas las consideraciones expuestas, se ha elaborado el diagrama de la figura 4 en el que se propone la forma empírica de calcular la altura (Hp) del sólido de cargas en función del GSI, del diámetro equivalente del túnel (D) y de la cobertura efectiva (H), para túneles excavados en roca.

Para la elaboración de este diagrama, se ha hecho referencia, entre otros, a la formulación original de AFTES y a la correlación propuesta por Hoek y Brown (1997) entre el ángulo de fricción global y cohesión global de un macizo rocoso y la calidad geomecánica del mismo macizo rocoso (GSI) y del correspondiente material rocoso (m_i y C_o) dominante (figura 5), obteniéndose finalmente mediante simulación la fórmula con la cual se ha

construido el diagrama propuesto:

$$\beta = \frac{6.25}{H/D} \exp\left(\frac{50 - GSI}{25}\right)$$

A manera de complemento, resulta interesante señalar que probablemente los valores del GSI que deben utilizarse para el cálculo propuesto, no necesariamente deberán ser los valores correspondientes al macizo rocoso natural sino los valores (más bajos) correspondientes al macizo rocoso ya afectado (disturbado) por la excavación. Posiblemente un criterio aceptable será el de considerar los valores del GSI natural para calcular las cargas sobre el soporte a corto plazo, y luego considerar los valores del GSI residual para calcular las cargas sobre el revestimiento a largo plazo.

GSI residual (GSI_{res})

En cuanto a como sea posible estimar los valores numéricos del GSI residual, pueden hacerse las consideraciones que siguen:

En la actualización del criterio de rotura para macizos rocosos del 1988, Hoek y Brown presentaron las siguientes fórmulas empíricas para el cálculo de los parámetros picos y residuales ($m - s - m_r - s_r$) en función de la calidad del macizo rocoso (RMR):

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right); \frac{m_r}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right); s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right); s_r = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right)$$

PARAMETROS DE HOEK (1988)

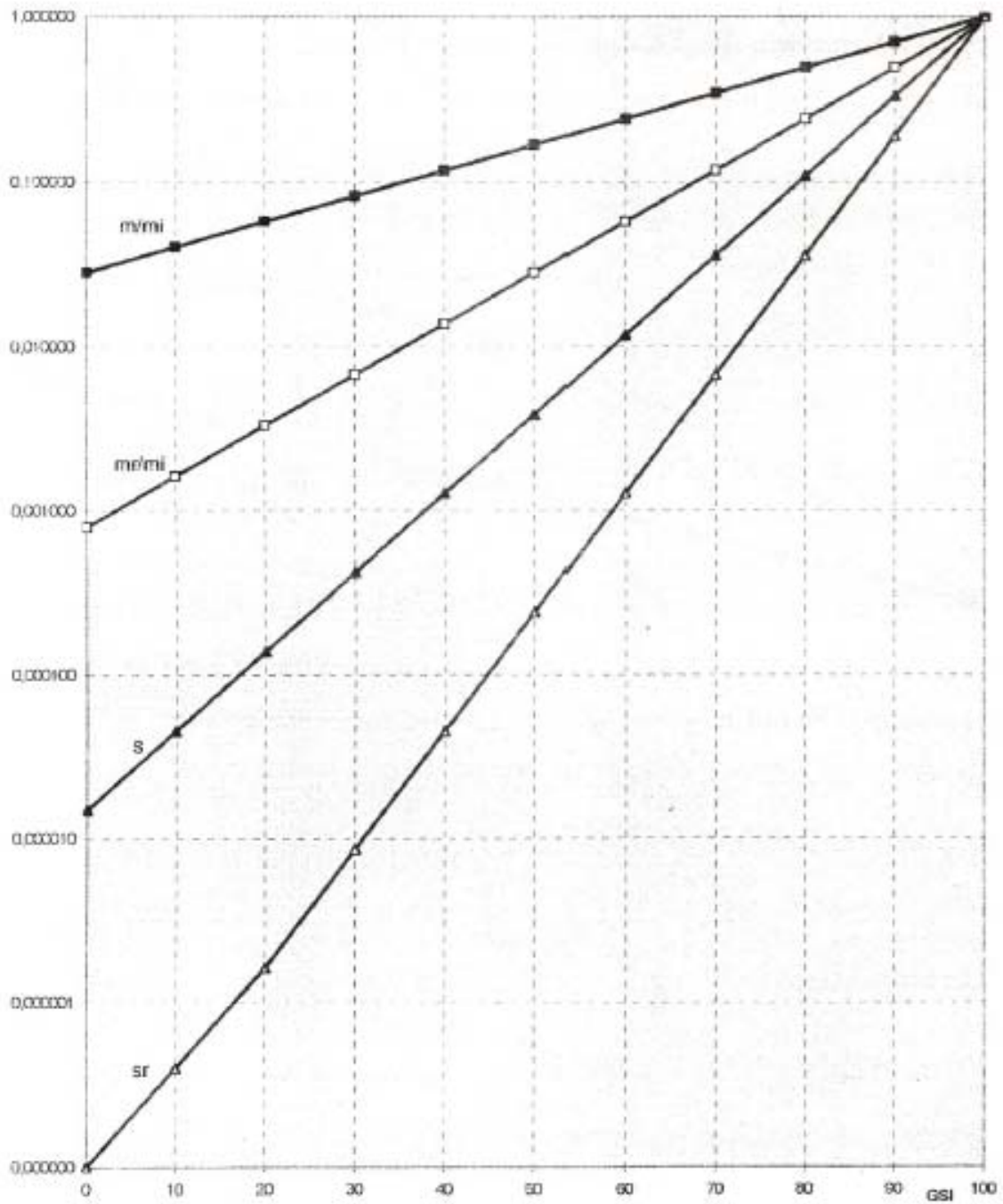
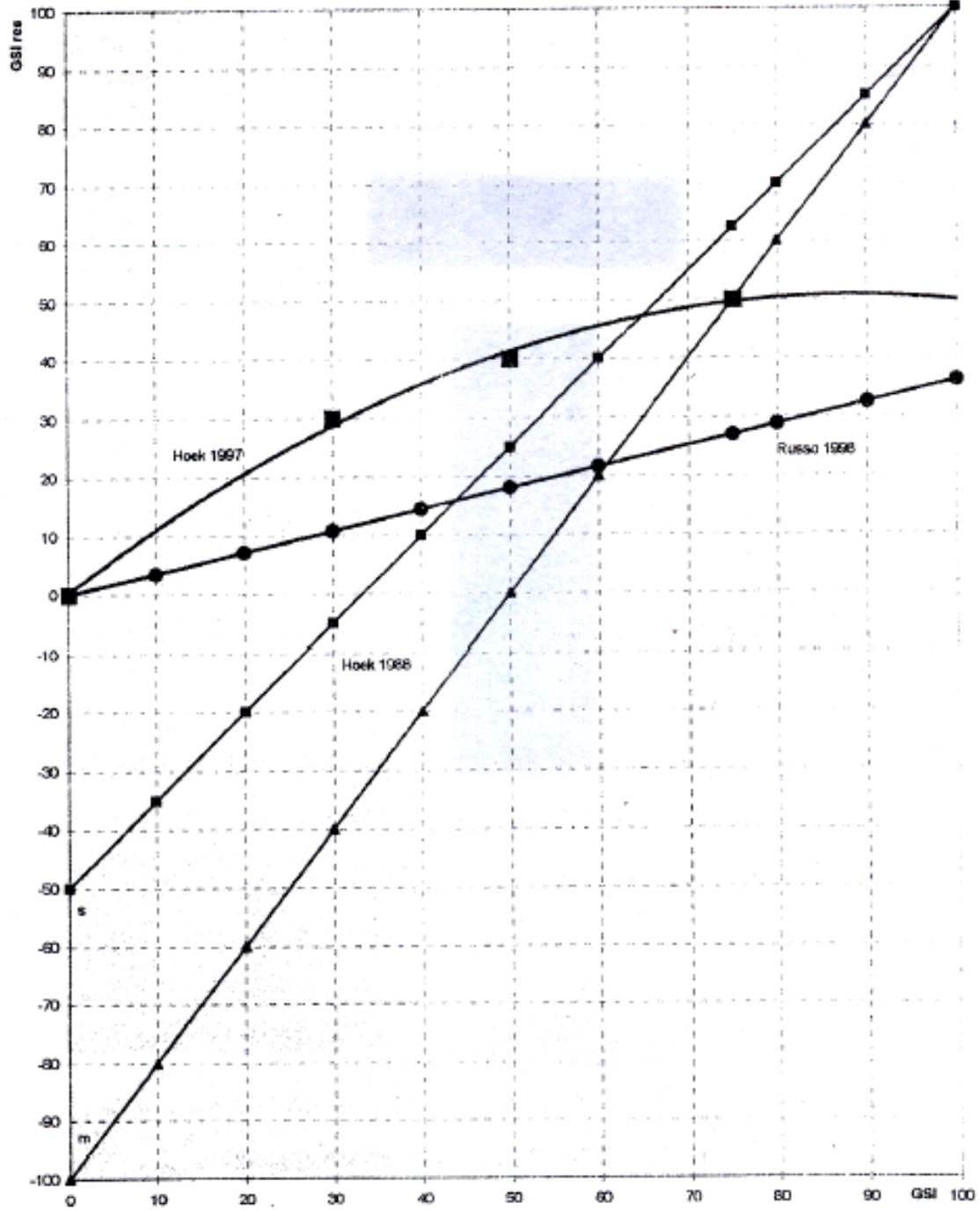


FIGURA N. 6

GSI res Vs GSI



PARAMETROS ACTUALES DE HOEK

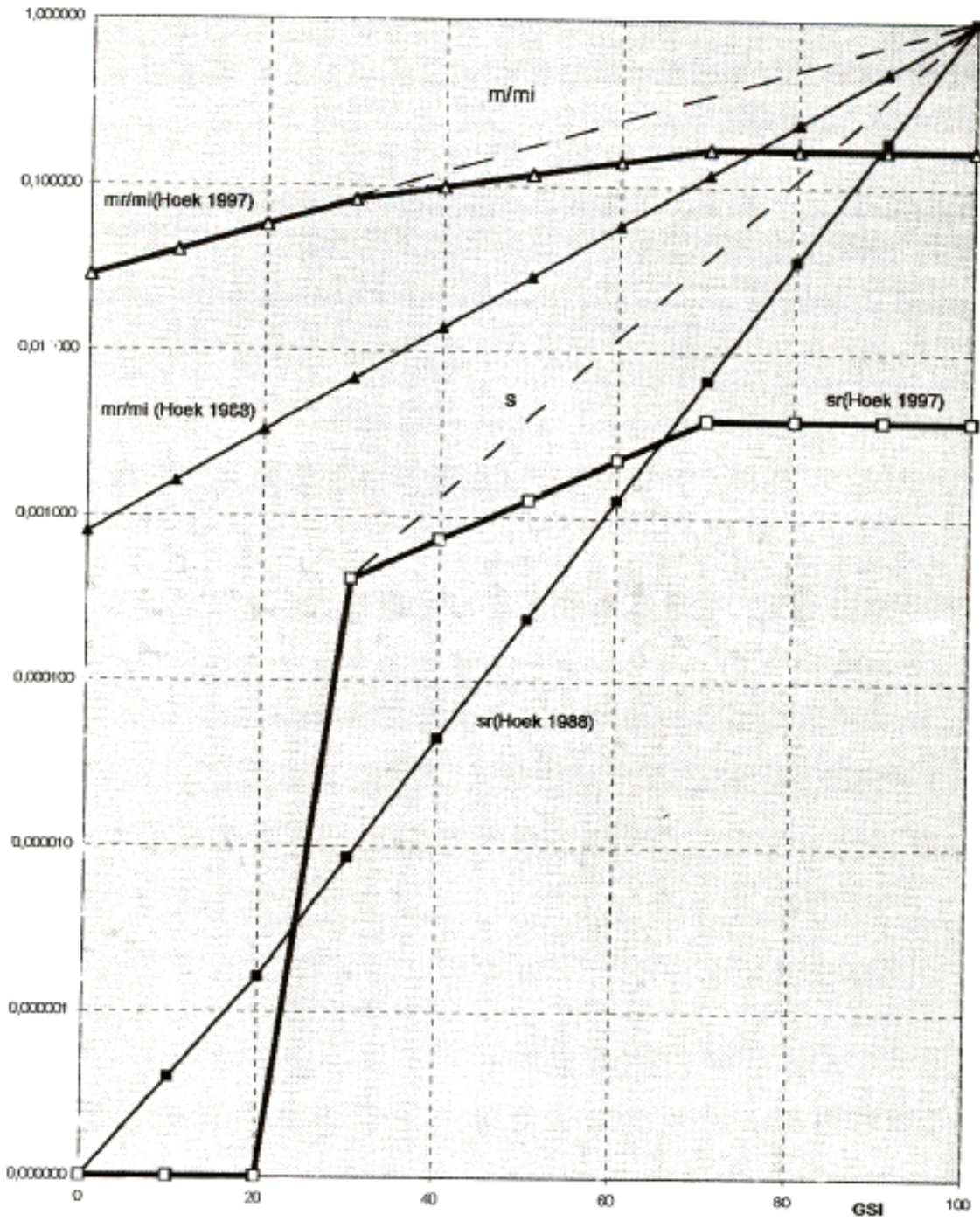


FIGURA N. 8

Bibliografia

Terzaghi K. 1946. Rock defects and loads on tunnel supports. Rock tunneling with steel support Proctor & Withe.

Protodyakonof M. 1960. Klassifikacija gorotvoru. Moscow.

AFTES 1988. Recommandations de Association Francaise des Travaux en Souterrains. Paris.

Hoek E. and Brown E.T. 1980. Underground excavations in rock. I.M.M. London

Hoek E. and Brown E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34(8).

Hoek E. 1998. Putting numbers to geology - An engineer's viewpoint. Quarterly J. Eng. Geol.

Russo, G., Kalamaras, G.S. and Grasso P. 1998. Geomechanical Classes, behaviour categories and technical classes for an underground project. Gallerie e grandi opere sotterranee. March, N.54.

Hoek E. and Brown E.T. 1988. The H & B failure criterion – a 1988 update. 15th Can. Rock Mech. Simp. Toronto.

Hoek E. 1994. Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2).