

# Túnel de acceso a la Mina El Placer-El Dorado-Venezuela

## Access tunnel to the Mina El Placer-El Dorado-Venezuela

Gianfranco Perri

*Ingeniero proyectista consultor. Profesor de Diseño de Túneles en la Universidad Central de Venezuela*

---

### Resumen

*Aunque no sea muy amplia la tradición minera subterránea en Venezuela, hace excepción la minería del oro en la región suroriental, donde desde hace muchos años existen explotaciones subterráneas y las mismas se han visto reforzadas y ampliadas en años recientes, gracias al notable incremento internacional del precio del oro. La Mina el Placer es un buen ejemplo de este nuevo interés en Venezuela para la minería subterránea del oro. Se trata de una nueva mina para la cual se ha planificado construir una importante galería de acceso, en un ambiente geológico-geomecánico relativamente precario (suelo residual argilizado y roca saprolítica que transita gradualmente a rocas meteorizadas y finalmente frescas, típicamente andesitas). En el artículo se presentan los criterios de diseños adoptados y los resultados obtenidos para el diseño geotécnico-estructural del referido túnel: sus soportes. Tales criterios aplican el concepto estadístico de Probabilidad de falla en alternativa al concepto tradicional de Factor de seguridad.*

### Abstract

*Although is not very extensive underground mining tradition in Venezuela, makes exception gold mining in the southeast region of the country, where from many years there are underground operations that have been strengthened and expanded in recent years, amid strong international growth price of gold. The "Mina El Placer" is a good example of this new interest in Venezuela for the underground mining of gold. This is a new mine for which it plans to build a major access gallery, in a relatively poor geological-geomechanical (clay residual soil and rock that moves gradually saprolitic weathered rocks and finally fresh, typically andesite). The paper presents the design criteria adopted and the results obtained for the geotechnical, structural design of that tunnel: its supports. These criteria apply the statistical concept of Probability of Failure as an alternative to traditional Safety Factor.*

## 1 INTRODUCCIÓN

En Venezuela es bien conocido que la minería subterránea presenta tradicionalmente un desarrollo limitado y circunscrito a la minería del oro en el Estado Bolívar ubicado en la región suroriental del País.

Además de la tradicional Mina del Callao, explotada en subterráneo por el estado venezolano con continuidad desde hace varias décadas, en años más recientes y con la importante subida del precio internacional del oro, han adquirido interés económico algunos yacimientos auríferos menores, siempre ubicados en el mismo distrito minero del Callao y el gobierno venezolano ha emprendido una política de apertura a las concesiones de exploración y explotación del oro.

Dentro de este contexto económico se enmarca la concesión otorgada a una sociedad de capital privado ruso para la explotación de la mina subterránea El Placer, ubicada en cercanía del poblado El Dorado, y para emprender su desarrollo se ha elaborado el proyecto de la galería de acceso a la veta mineralizada cuyos lineamientos técnicos principales se presentan en este trabajo.

En la Figura 1 se presenta la ubicación regional de la Mina El Placer y en la Figura 2 se presenta la topografía del área en donde resalta el Box Cut desde el cual se ha planeado abrir el acceso al subterráneo.

La situación existente para el momento de elaborarse el diseño de la galería de acceso al subterráneo también se ilustra en la fotografía de la Figura 3.

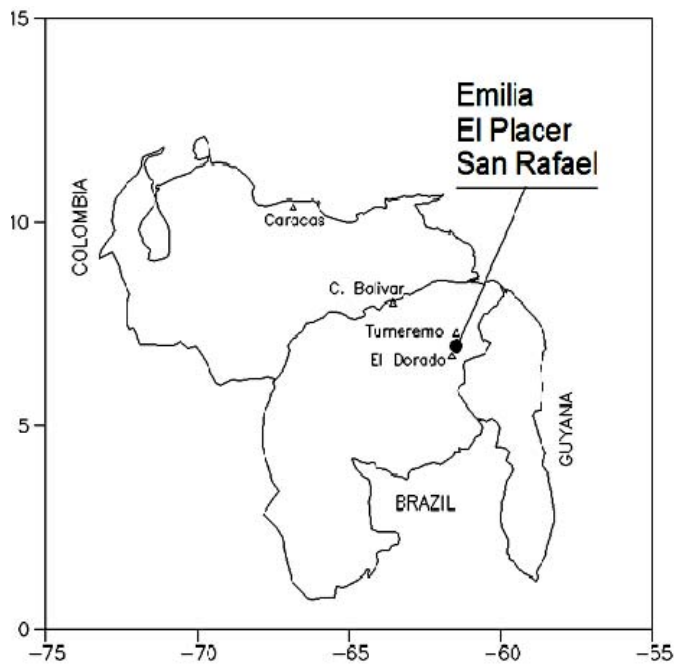


Figura 1 Ubicación regional de la Mina El Placer

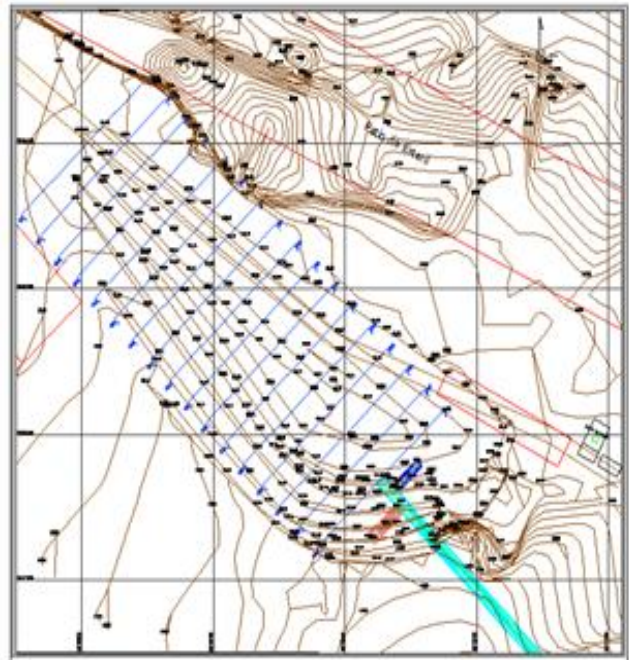


Figura 2 Topografía del Box Cut del Acceso



Figura 3 Box Cut del Acceso al Subterráneo

La galería de acceso al subterráneo a diseñar, ha sido prevista con una sección a "baúl" (Figura 4), un ancho neto de 4 metros y una altura en eje de 4,50 metros, siendo el primer aspecto a enfrentar y definir el relativo al portal y emboquillado para la galería, los cuales deben ser compatibilizados con las condiciones geométricas topográficas y geomorfológicas de un territorio ya precedentemente y profundamente intervenido, así como claramente evidenciado en la misma foto de la Figura 3.

El diseño del portal, además de garantizar la suficiente estabilidad de la única vía de acceso al subterráneo durante toda la vida útil de la mina, también debe al mismo tiempo ofrecer una cobertura adecuada a la estabilidad de los primeros metros lineales de excavación del túnel y por lo tanto, la pendiente del talud frontal debe ser relativamente elevada y luego debe ser mecánicamente estabilizada en consecuencia con sus dos alas más próximas al túnel.

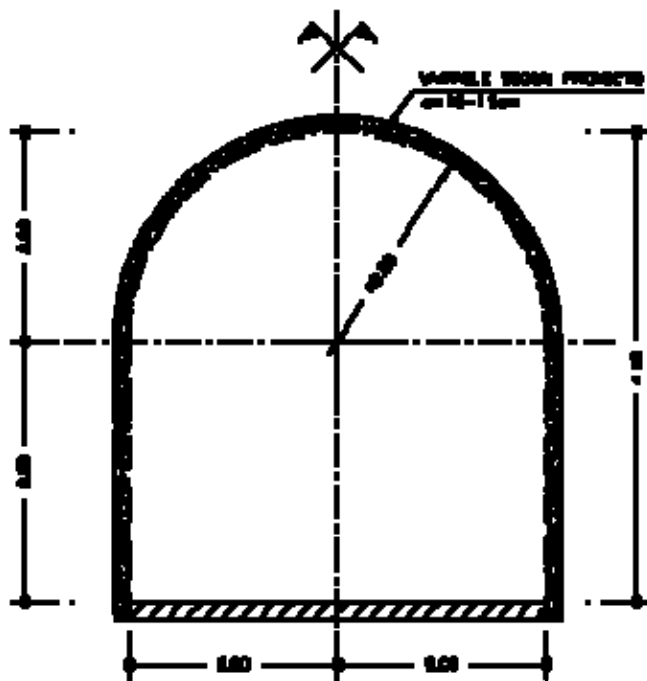


Figura 4 Sección del Túnel de Acceso a la Mina

## 2 GEOLOGÍA

El ambiente litológico dentro del cual se construirán las obras superficiales del portal y se excavará en subterráneo los aproximadamente 450 metros lineales del túnel de acceso a la mina, está esencialmente caracterizado por un espeso horizonte sub-superficial de suelos residuales argilizados y luego de rocas saprolíticas que transitan gradualmente a rocas meteorizadas y finalmente frescas, típicamente andesita.

En el Pit antiguo (Figura 3) el cual serviría de ingreso para la rampa subterránea de acceso a la mina, se observan las rocas argilitizadas producto de la alteración meteórica típica de las zonas tropicales, las cuales presentan diversas tonalidades producto de la oxidación de la pirita y de la calcopirita.

Principalmente se observan las lentes de caolín de colores blanco, amarillento, marrón claro y púrpura a rojizo, las cuales por sectores están intercaladas con microvetillas de cuarzo y con cavidades producto de la desintegración de la pirita.

Estas características (Saprolita) se muestran por unos 40 metros de profundidad medidos desde la superficie para luego ir pasando gradualmente a las de roca alterada, fracturada y con poca oxidación (Saproroca) la cual se presenta localmente con un espesor aproximado de 15 metros en promedio antes de, finalmente, pasar gradualmente a la roca fresca.

Todos esos contactos se extienden en forma paralela a la topografía y considerando la pendiente del túnel ( $>10\%$ ) y su longitud (450 m) es de prever que las excavaciones, alcanzando los 70 m de cobertura máxima, interceptarán todos los tres horizontes geomecánicos descritos (Figura 5).

## 3 GEOMECANICA

La caracterización geomecánica de los sectores macroscopicamente homogéneos del túnel se ha encentrado en los tres parámetros geomecánicos independientes: el primero el Geological Strength Index (GSI) relativo al macizo rocoso, y los otros dos, la resistencia a la compresión inconfiada  $\sigma_{ci}$  y el parámetro friccionante de Hoek  $m_i$  relativos al material rocoso.

El GSI se ha evaluado a partir del levantamiento geológico y del registro de las perforaciones exploratorias disponibles, mientras que los parámetros de resistencia  $\sigma_{ci}$  y  $m_i$  se han deducido, respectivamente, de los ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras representativas extraídas de las perforaciones y de la caracterización litológica (Tabla 1 y figuras anexas).

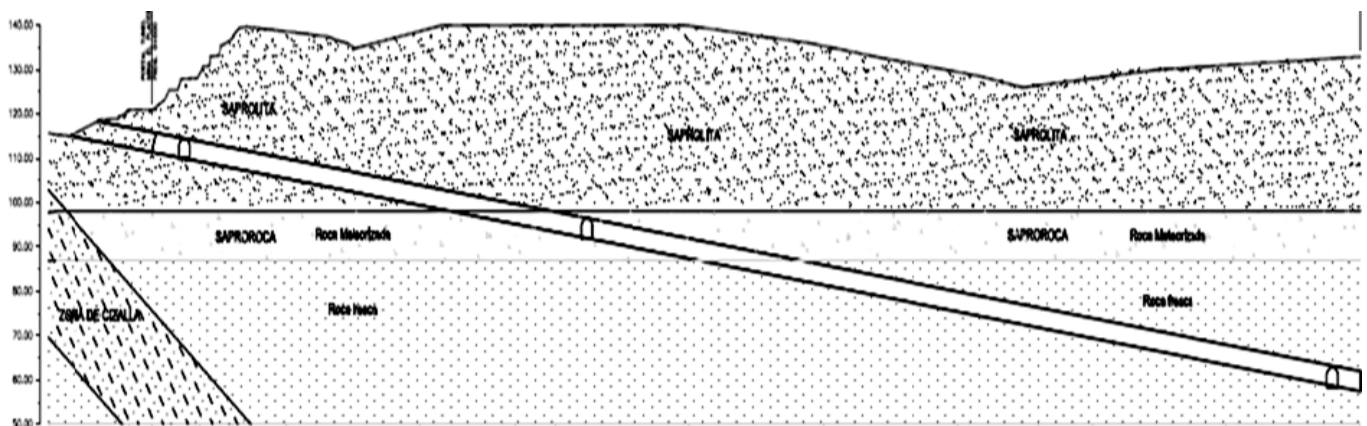


Figura 5

Tabla 1 Características geotécnicas independientes

| TIPO DE TERRENO                                                       | GSI<br>[(Min. - Med. - Max.)] | $m_i$<br>[(Min. - Med. - Max.)] | $\sigma_{ci}$ (MPa)<br>[(Min. - Med. - Max.)] |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>GG5 Saprolita</b><br>Suelo residual y Roca descompuesta            | (20 – 30)                     | (7 – 9)                         | (5 – 10)                                      |
| <b>GG4 - GG3 Saprroca</b><br>Roca meteorizada blanda y muy fracturada | (30 – 40)                     | (15 – 20)                       | (25 – 50)                                     |
| <b>GG2 Roca Andesita</b><br>Roca fresca dura y poco fracturada        | (40 – 60)                     | (20 – 25)                       | (50 – 70)                                     |

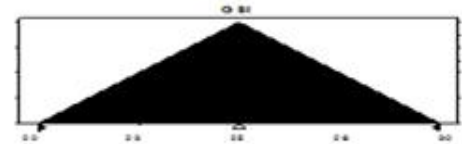
**Assumption: GSI**

Cell: D16

Triangular distribution with parameters:

Minimum 20  
Likeliest 25  
Maximum 30

Selected range is from 20 to 30  
Mean value in simulation was 25



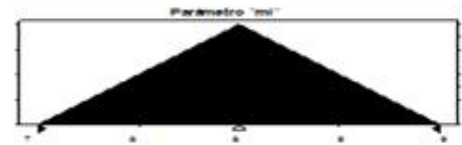
**Assumption: Parámetro "mi"**

Cell: D12

Triangular distribution with parameters:

Minimum 7  
Likeliest 8  
Maximum 9

Selected range is from 7 to 9  
Mean value in simulation was 8



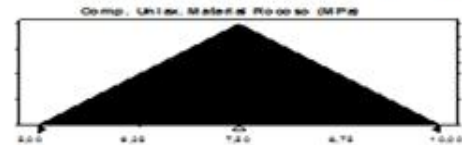
**Assumption: Comp. Uniax. Material Rocoso (MPa)**

Cell: D11

Triangular distribution with parameters:

Minimum 5,00  
Likeliest 7,50  
Maximum 10,00

Selected range is from 5,00 to 10,00  
Mean value in simulation was 7,52



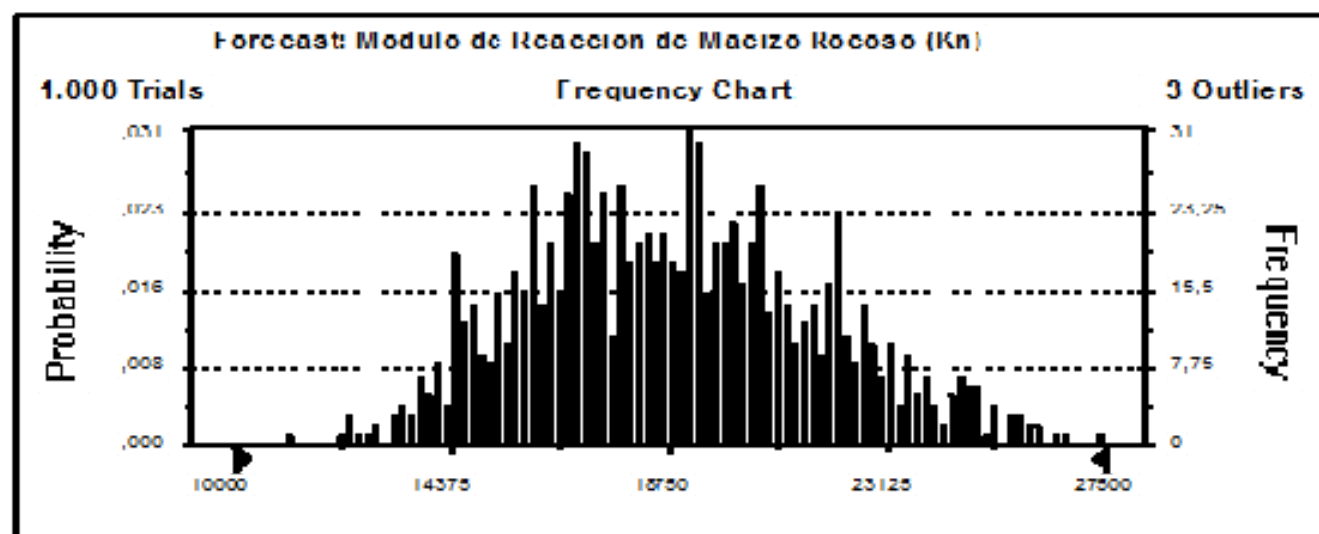
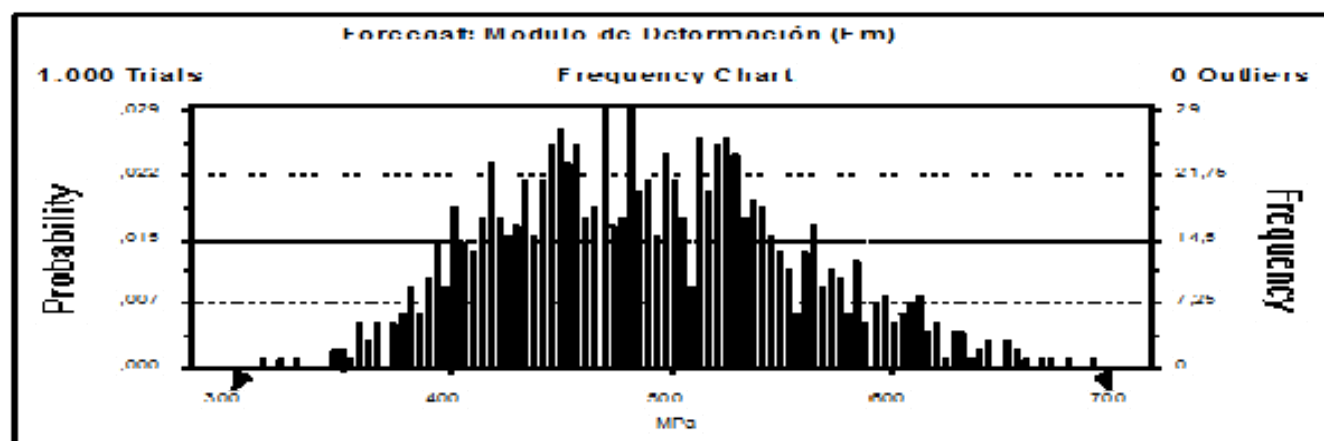
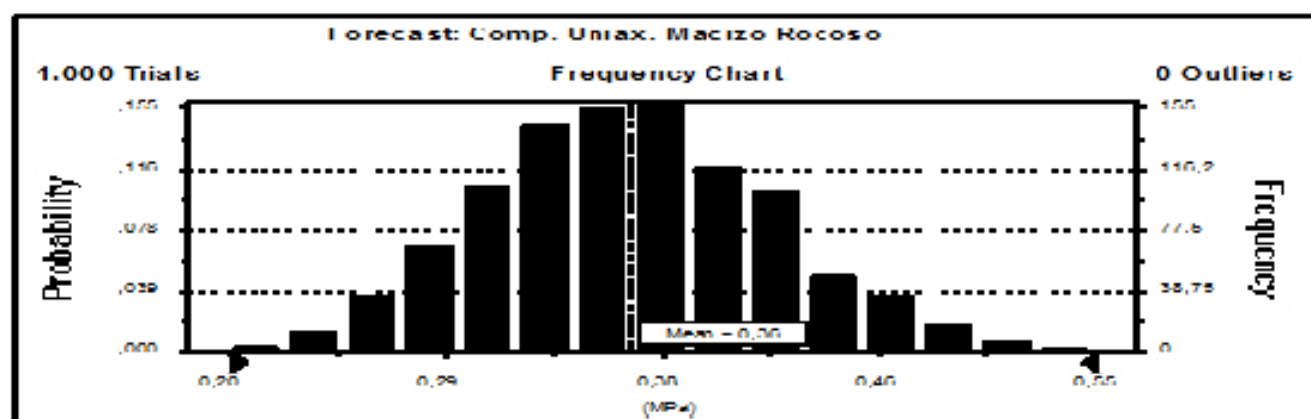
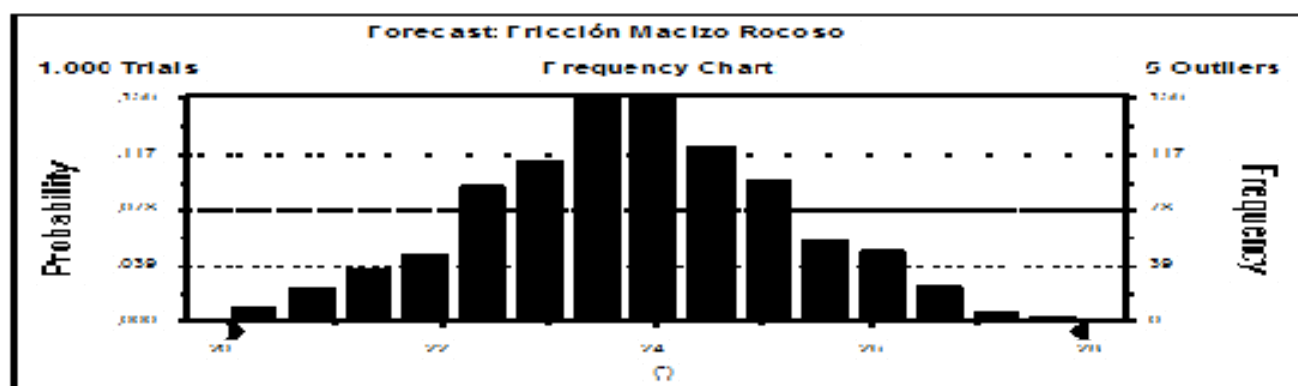
Luego, los parámetros geomecánicos para el macizo rocoso derivados con la simulación estadística se han obtenido (Tabla 2 y figuras anexas) aplicando las siguientes correlaciones:

$$\begin{aligned}\varphi_m &= 0.424 \text{ GSI} - 0.0016 \text{ GSI}^2 - 6 + 9L_n m_i \\ \sigma_{cm} &= (0.0034 m_i^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_i)}]^{GSI} \\ E_m &= 1000 (\sigma_{ci} / 100)^{1/2} 10^{(GSI - 10) / 40} \\ K_n &= E_m (1 + \nu) / D\end{aligned}$$

( $\nu$ =Módulo de Poisson;  $D$ =diámetro excavación)

Tabla 2 Características geotécnicas derivadas

| TIPO DE TERRENO                                                       | $\varphi_m$<br>[Med. - Des.] | $\sigma_{cm}$ (MPa)<br>[Med. - Des.] | $E_m$ (MPa)<br>[Med. - Des.] | $K_n$ (t/m <sup>3</sup> )<br>[Med. - Des.] |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>GG5 Saprolita</b><br>Suelo residual y Roca descompuesta            | 24<br>( $\delta=1$ )         | 0,36<br>( $\delta=0,06$ )            | 489<br>( $\delta=67$ )       | 18889<br>( $\delta=2958$ )                 |
| <b>GG4 - GG3 Saprroca</b><br>Roca meteorizada blanda y muy fracturada | 34<br>( $\delta=2$ )         | 3,99<br>( $\delta=0,61$ )            | 1299<br>( $\delta=177$ )     | 50283<br>( $\delta=7672$ )                 |
| <b>GG2 Roca Andesita</b><br>Roca fresca dura y poco fracturada        | 49<br>( $\delta=2$ )         | 11,78<br>( $\delta=1,74$ )           | 3966<br>( $\delta=955$ )     | 153943<br>( $\delta=39126$ )               |



## 4 DISEÑO DE LOS SOPORTES

La selección y diseño del soporte se basan en el cálculo de la carga a soportar (la demanda, función de las condiciones geomecánicas y geotopográficas previstas) y sobre la resistencia estructural de las diferentes tipologías seleccionadas (la capacidad, función de dimensiones y materiales).

### 4.1 Determinación de las cargas

En cuanto a las cargas a esperar sobre los soportes del túnel, de acuerdo con las recomendaciones AFTES, para estimarlas se debe determinar el valor de la cobertura ( $H$ ) que delimita la aplicabilidad de los criterios para secciones profundas de los criterios para secciones no profundas:

*Secciones “no profundas”:* para  $H < 2.5 B$   
*Secciones “profundas”:* para  $H \geq 2.5 B$

Donde “ $B$ ” es el ancho del sólido de cargas:

$$B = b + 2 h \tan (45 - \varphi/2)$$

siendo “ $b$ ” el ancho de la sección de excavación y siendo “ $h$ ” su altura, mientras “ $\varphi$ ” es el ángulo de fricción del terreno dentro del cual excavar con cuya disminución aumenta el ancho del sólido de cargas “ $B$ ” y en consecuencia la cobertura límite de separación o frontera ( $H_{\text{lim}} = 2.5 B$ ).

En consideración de los valores que efectivamente poseen para el túnel en referencia los parámetros geométricos considerados ( $b \approx 4.0$  m y  $h \approx 4.5$  m), así como en consideración de los rangos que en la práctica dominan en cuanto a los valores del ángulo de fricción de los terrenos ( $\varphi \approx 25^\circ$ - $50^\circ$ ), resultan dimensiones para el ancho del sólido de cargas comprendidas entre 7 y 10 metros y conservadoramente iguales a 10 metros ( $\varphi \approx 25^\circ$ ).

Dentro de las Secciones “no profundas” se consideran “superficiales” aquellas secciones cuya cobertura ( $H$ ) no excede el ancho del sólido de cargas ( $B \approx 10$  metros) o el ancho de la excavación ( $b \approx 4$  metros), respectivamente según se trate de terrenos de características geomecánicas muy precarias con ( $\text{GSI} \leq 25$ ) o, viceversa con ( $\text{GSI} >> 25$ ).

Se consideran en cambio “intermedias” aquellas secciones “no profundas” que exceden las coberturas indicadas de ( $B \approx 10$  m) o ( $b \approx 4$  m), respectivamente según sea el caso y que alcanzan hasta el límite de  $2.5B$  ( $\approx 25$  m o  $\approx 10$  m).

Considerando un peso unitario medio ( $\gamma$ ) para todos los terrenos de la cobertura del túnel, dentro

de un orden de los  $2.0$  a  $2.3 \text{ g/cm}^3$ , resulta:

- para las secciones superficiales, las cargas son las gravitacionales: ( $\gamma H$ )
- para las secciones intermedias, las cargas son las correspondientes a: ( $\gamma B$ ) o ( $\gamma b$ )
- para las secciones profundas, las cargas son las que deriven de las condiciones de equilibrio determinadas del análisis de interacción mediante el método de convergencia-confinamiento, denominado también método de las líneas características.

### 4.2 Selección de los soportes

En cuanto finalmente al proceso de definición del soporte a aplicar a lo largo del túnel, el mismo parte la pre-selección de los soportes en base a las tecnologías disponibles en el sitio de las excavaciones y en base a las clases de comportamiento previstas para la excavación y luego, después de calculadas las cargas (o demanda  $D$ ), se seleccionan los soportes correspondientes a cada sector de túnel en forma tal que los mismos posean una resistencia (o capacidad  $C$ ), compatiblemente superior a la respectiva demanda ( $D$ ) y con un adecuado factor de seguridad.

Las características geométricas y estructurales de los soportes seleccionados siguiendo los criterios expuestos (concreto proyectado, pernos metálicos y cerchas reticulares) se reportan en la Tabla 3 y se representan esquemáticamente en la Figura 6.

Las cargas calculadas siguiendo los procedimientos descritos se reportan en la Tabla 4 para las secciones no profundas, mientras para las secciones profundas, resultan los rangos de cargas (“demanda” a esperar sobre el soporte) reportados en la Tabla 5, obtenidos aplicando el Método de las Líneas Características, en función de los rangos de cobertura previstos y en función de los posibles grupos geomecánicos ( $\text{GGx}$ ) del terreno que se estima encontrar.

En la Tabla 6 finalmente, se reporta la “demanda” a esperar a lo largo de los 450 m lineales del túnel.

De acuerdo con los análisis expuestos, los resultados derivados en cuanto a la selección y distribución de los soportes a lo largo de los 450 metros lineales del túnel se reportan en la Tabla 7.

Mientras, para completar el proceso del diseño, en la Tabla 8 se reportan los correspondientes Factores de Seguridad de diseño y las Probabilidad de falla obtenidas de los análisis estadísticos.

Tabla 3 Características Geométricas y Estructurales de los Soportes

| Tipo | Concreto<br>Proyectado<br>(F'c=150 Kg/cm <sup>2</sup> ) | Costillas<br>Metálicas<br>(f'y = 4200 Kg/cm <sup>2</sup> ) | Pernos<br>Metálicos<br>(D= 43mm-9 toneladas) | Capacidad<br>(Kg/cm <sup>2</sup> )<br>(*) | Rigidez<br>(Kg/cm <sup>2</sup> /cm)<br>(*) |
|------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| SP-1 | 15 cm                                                   | Cercha 3 φ 5/8" @ 1 m                                      | 6 de 3 m @ costilla                          | <b>6,0</b><br>(δ=1,0)                     | <b>44</b><br>(δ=5,5)                       |
| SP-2 | 5 a 10 cm                                               | ----                                                       | eventuales de 3 m                            | <b>3,7</b><br>(δ=0,7)                     | <b>27</b><br>(δ=3,5)                       |
| SP-3 | ----                                                    | ----                                                       | eventuales de 3 m                            | ----                                      | ----                                       |

Tabla 4 Demanda (D) sobre Soporte para Secciones Superficiales e Intermedias (Kg/cm<sup>2</sup>)

| Coberturas (m)          | 5 – 15                      | 15 – 25                                    |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| <b>20 ≤ GSI ≤ 30</b>    | <b>γH = 2,1</b> (desv. 0,6) | <b>γ α (h+b) = 2,1</b> (desv. 0,3)         |
| <b>30 &lt; GSI ≤ 40</b> | <b>γH = 2,1</b> (desv. 0,6) | <b>γ α (h+b) min: γB = 2,1</b> (desv. 0,1) |
| <b>40 &lt; GSI ≤ 60</b> | <b>γH = 2,1</b> (desv. 0,6) | <b>γ α (h+b) min: γB = 2,0</b> (desv. 0,1) |

Tabla 5 Demanda (D) sobre Soporte para Secciones Profundas (Kg/cm<sup>2</sup>)

| Coberturas (m)          | 25 – 40                | 40 – 50                | 50 – 70                |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>20 ≤ GSI ≤ 30</b>    | <b>1,2</b> (desv. 0,3) | <b>1,7</b> (desv. 0,3) | <b>2,6</b> (desv. 0,5) |
| <b>30 &lt; GSI ≤ 40</b> | <b>0,5</b> (desv. 0,1) | <b>0,5</b> (desv. 0,1) | <b>0,7</b> (desv. 0,2) |
| <b>40 &lt; GSI ≤ 60</b> | <b>0,3</b> (desv. 0,2) | <b>0,2</b> (desv. 0,1) | <b>0,3</b> (desv. 0,2) |

Tabla 6 Demanda (D) a esperar sobre el Soporte Primario a lo largo del túnel (Kg/cm<sup>2</sup>)

| Coberturas (m)          | 5 – 15                    | 15 – 25                   | 25 – 40                   | 40 – 50                   | 50 – 70                   |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Progresivas (m)         | 0 – 18                    | 18 – 30                   | 30 – 135                  | 135 – 330                 | 330 – 450                 |
| <b>20 ≤ GSI ≤ 30</b>    | <b>2,1</b><br>(desv. 0,6) | <b>2,1</b><br>(desv. 0,3) | ---                       | ---                       | ---                       |
| <b>30 &lt; GSI ≤ 40</b> | ---                       | ---                       | <b>0,5</b><br>(desv. 0,1) | <b>0,5</b><br>(desv. 0,1) | ---                       |
| <b>40 &lt; GSI ≤ 60</b> | ---                       | ---                       | ---                       | ---                       | <b>0,3</b><br>(desv. 0,2) |

Tabla 7 Selección y Distribución a lo largo del túnel del Tipo de Soporte Vs. GSI y Cobertura.

| Coberturas<br>(m)            | 5 – 15 | 15 – 25 | 25 – 40  | 40 – 50   | 50 – 70   |
|------------------------------|--------|---------|----------|-----------|-----------|
| Progresivas (m)              | 0 – 18 | 18 – 30 | 30 – 135 | 135 – 330 | 330 – 450 |
| $20 \leq \text{GSI} \leq 30$ | SP-1   | SP-1    | N.P.     | N.P.      | N.P.      |
| $30 < \text{GSI} \leq 40$    | N.P.   | N.P.    | SP-2     | SP-2      | N.P.      |
| $40 < \text{GSI} \leq 60$    | N.P.   | N.P.    | N.P.     | SP-2      | SP-2      |
| $\text{GSI} > 60$            | N.P.   | N.P.    | N.P.     | SP-3      | SP-3      |

**N.P.** = *No Probable de poder ocurrir*

Tabla 8 Margen de Seguridad (C-D), Probabilidad de Falla (p%) y Factor (FS)

| Coberturas (m)               | 5 – 15                                | 15 – 25                               | 25 – 40                               | 40 – 50                               | 50 – 70                               |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Progresivas (m)              | 0 – 18                                | 18 – 30                               | 30 – 135                              | 135 – 330                             | 330 – 450                             |
| $20 \leq \text{GSI} \leq 30$ | 6,0 – 2,1<br>$p = 2,6 \%$<br>FS = 2,9 | 6,0 – 2,1<br>$p = 1,6 \%$<br>FS = 2,9 | ---                                   | ---                                   | ---                                   |
| $30 < \text{GSI} \leq 40$    | ---                                   | ---                                   | 3,7 – 0,5<br>$p = 0,2 \%$<br>FS > 3,0 | 3,7 – 0,5<br>$p = 0,6 \%$<br>FS > 3,0 | ---                                   |
| $40 < \text{GSI} \leq 60$    | ---                                   | ---                                   | ---                                   | ---                                   | 3,7 – 0,3<br>$p = 0,2 \%$<br>FS > 3,0 |

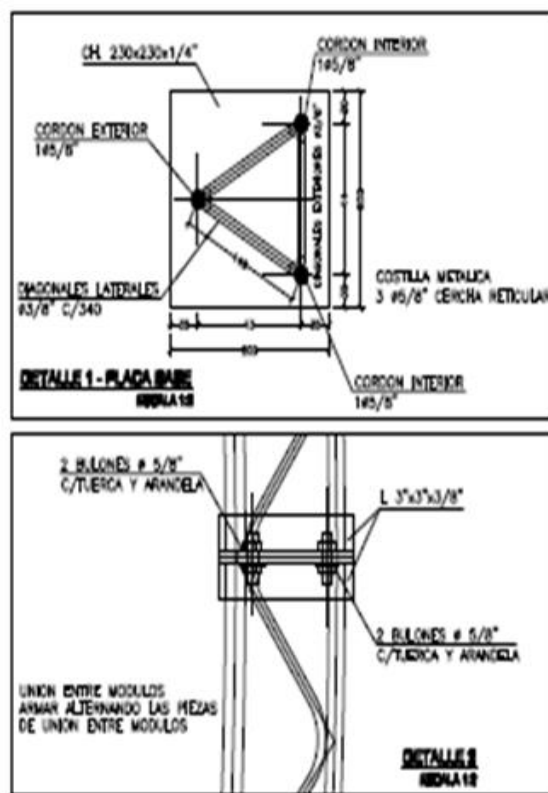
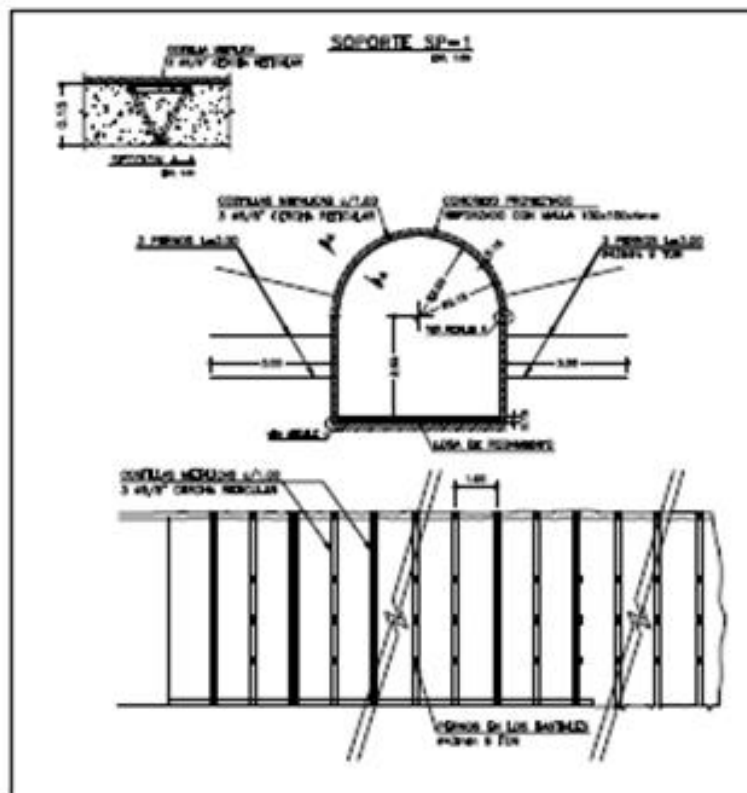


Figura 6 Soporte típico del túnel y detalles de las cerchas reticulares

Efectivamente, el diseño del soporte del túnel de acceso a la mina que se ha presentado, se ha llevado a cabo con directa referencia al concepto estadístico de probabilidad de falla del soporte, el cual desde un punto de vista conceptual se presta muy bien para tomar en cuenta las variabilidades intrínsecas sea a la capacidad del soporte (por ejemplo, la resistencia y espesor del concreto proyectado) y sea a la demanda actuante (por ejemplo los parámetros geomecánicos GSI,  $\sigma_{ci}$  y  $m_i$ ).

Es de hecho bien sabido que la confiabilidad de un diseño no está cabalmente representada y menos aún correctamente medida, por el factor de seguridad: un factor de seguridad de 1.1 no garantiza el buen comportamiento de una obra, ni un factor de seguridad de 1.8 es indicio cierto de una mayor confiabilidad de una obra que la que posee un factor de seguridad de 1.5, ni un factor de seguridad de 3 o más garantiza con toda seguridad la imposibilidad de una falla.

Conceptualmente inclusive, no debería haber cabida para la aseveración de una seguridad matemáticamente absoluta en una obra de ingeniería: siempre en la práctica hay una posibilidad de falla, el problema es cuan baja debe ser matemáticamente esta probabilidad para que el diseño de la obra sea considerado técnicamente confiable y económicamente aceptable.

Sin embargo debe reconocerse que el impacto emocional de proponer al público no especialista que existe siempre un riesgo finito (aunque pequeño) de falla asociada al diseño de una obra, es tal que dificulta la propuesta de reemplazar definitivamente el concepto clásico de factor de seguridad con el de probabilidad de falla o con el índice de confiabilidad de una obra. Y por tal motivo, también en este diseño específico, se reportan los resultados deterministas del Factor de Seguridad del Soporte a lado de los resultados estadísticos de la Probabilidad de Falla del Soporte.

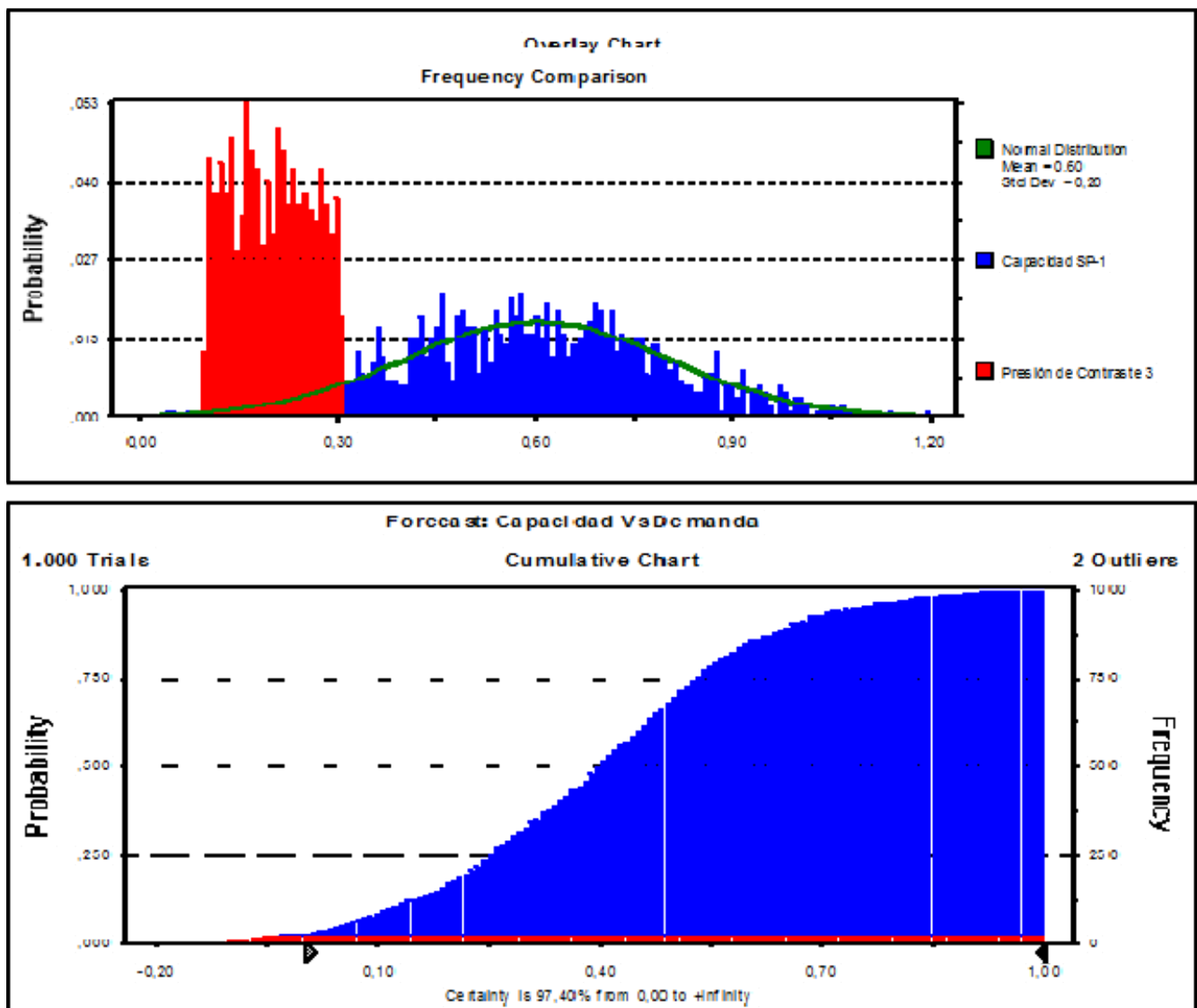


Figura 7 Demanda, Capacidad y Probabilidad de Falla

## 5 CONCLUSIONES

También los túneles mineros, aunque con dimensiones y extensiones limitadas, especialmente cuando están destinados a cumplir una función vital para la mina y relativamente prolongada en el tiempo, pueden y deben ser diseñados recurriendo a modelaciones suficientemente realistas y que al mismo tiempo permitan cuantificar la confiabilidad estructural de los soportes a instalar.

En este orden de ideas se ha presentado un ejemplo sencillo en el que se ha mostrado cómo seleccionar y dimensionar estructuralmente el soporte de un túnel minero de acceso, a ser excavado dentro de un ambiente geomecánico en buena parte precario.

Para efectuar los análisis geomecánicos del diseño se ha recurrido al concepto de Probabilidad de falla del soporte en alternativa al más tradicional concepto de Factor de seguridad del soporte, aprovechando así el gran avance conceptual que para un diseño estructural implica tal metodología estadística, por permitir tomar en cuenta y cuantificar realísticamente todo un amplio conjunto de variabilidades e incertidumbres intrínsecas al ambiente natural de las excavaciones y de las construcciones subterráneas.

De hecho, y lamentablemente, la confiabilidad de un diseño geotécnico no está cabalmente representada y menos aún correctamente medida, por el factor de seguridad: un factor de seguridad de 1.1 no garantiza el buen comportamiento de una estructura, ni un factor de seguridad de 1.8 es indicio cierto de una mayor confiabilidad de una estructura que la que posee un factor de seguridad de 1.5, ni un factor de seguridad de 5 garantiza con toda seguridad la imposibilidad de una falla.

Conceptualmente por cierto, no debería haber cabida para la aseveración de una seguridad matemáticamente absoluta en una obra de ingeniería: siempre en la práctica hay una posibilidad de falla, el problema es cuán baja debe ser matemáticamente esta probabilidad para que el diseño de la obra sea considerado técnicamente confiable y económicamente aceptable.

En efectos, no hay dudas que conceptualmente represente un salto cualitativo importante y positivo el pasar de un concepto a otro, aunque debe reconocerse que (Hoek): “el impacto emocional de proponer al público no especialista que existe siempre un riesgo finito (aunque pequeño) de falla asociado al diseño de un túnel, es tal que dificulta la propuesta de reemplazar el factor de seguridad estándar con la probabilidad de falla o con el índice de confiabilidad de un túnel”.

## REFERENCIAS

- G. Perri A. "*Diseño Geotécnico de Túneles*". Ediciones Innovación Tecnológica EdIT (262 pgs.), Diciembre 1990, Caracas - Venezuela.
- H. Hoek "*Strength of rock and rock masses*" ISRM News Journal, 2(2), 4-16, 1994.
- H. Hoek, P.K. Kaiser; W.F. Bawden "*Support of underground excavations in hard rock*". Balkema, Rotterdam, 1995.
- H. Hoek & E.T.B. "*Practical estimates on rock mass strength*" Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts 34(8), 1997.
- G. Perri A. "*Validez relativa del valor numérico del factor de seguridad de un talud*". Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, N. 74, Junio 1998.
- H. Hoek, C. Carranza-Torres; B. Corkum "*Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition*". Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting.
- G. Perri A. "*Túneles excavados convencionalmente: Geomecánica Soportes y Revestimientos. La experiencia Italiano-Venezolana*". Simposio Colombiano de Túneles y Obras Subterráneas, 28 Octubre 2005, Bogotá - Colombia.
- G. Perri A. "*Clases de comportamiento y cargas de diseño para túneles excavados convencionalmente*". VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas, 8-13 Octubre 2006, Cartagena - Colombia.
- G. Perri A. "*Behavior category and design loads for conventionally excavated tunnels*". XI International Congress on Rock Mechanics, Julio 2007 Lisboa - Portugal, 9 -13.