

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Estabilidad, por formación de cuñas, para un túnel en roca

Joel Rodríguez Serralde y Guillermo Franco Serrato
Comisión Federal de Electricidad.
Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, México.



ABSTRACT

In this document is presented the revision of the stability, for formation of wedges, for a tunnel in rock and that it will operate like part of the deviation work for the construction of a dam. They are defined the geological and geotechnical conditions of the place in study, the analysis methodology is described, the interpretation of the results is presented and the treatments are designed for its correct stability. Finally, the best treatment option is selected, looking for a rational design.

RESUMEN

En este documento se presenta la revisión de la estabilidad, por formación de cuñas, para un túnel en roca y que operará como parte de la obra de desvío para la construcción de una presa. Se definen las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio en estudio, se describe la metodología de análisis, se presenta la interpretación de los resultados y se diseñan los tratamientos para su correcta estabilidad. Finalmente se selecciona la mejor opción de tratamiento, buscando un diseño racional.

1 ANTECEDENTES

Como parte de los estudios para llevar a cabo el proyecto y construcción de una presa, la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), llevó a cabo los estudios complementarios de ingeniería básica. El propósito de la Presa es el de contar con fuentes futuras para el abastecimiento de agua potable. Como parte de los trabajos se encuentra el diseño geotécnico de las diversas obras del proyecto.

1.1 Alcances y objetivo

Se presenta el análisis de estabilidad por formación de cuñas debido a la excavación de un túnel de 15 m en sección portal que se construirá en roca y que operará como parte de la obra de desvío para una presa de almacenamiento en el Estado de Jalisco. El objetivo de este documento es presentar los estudios y análisis geotécnicos realizados para el diseño del túnel de desvío y de sus tratamientos. Los análisis fueron realizados con base en la información Geológica, Geofísica y Geotécnica obtenida de los trabajos de campo, laboratorio y gabinete.

1.2 Condiciones geológicas del sitio de estudio

Dentro de las actividades de campo programadas para este proyecto, se realizaron varias campañas de exploración, a través de las cuales fue posible obtener la información Geológica, Geofísica y Geotécnica en el sitio elegido para la construcción de la cortina de la Presa, así como para el sitio destinado a la obra de desvío. La información se obtuvo a partir de barrenos de exploración directa, pruebas de campo, pruebas de laboratorio, levantamientos geológicos de detalle, etc.

Como resultado de la interpretación de las actividades antes mencionadas, se desarrolló un modelo Geológico-Geotécnico, el cual sintetiza las características que conforman el sitio. En general las secciones geológicas utilizadas para la elaboración de los análisis geotécnicos presentan la siguiente secuencia de unidades geológicas:

Superficialmente existen zonas con depósito de talud (Qdt) en ambos márgenes de río y cuyas propiedades geotécnicas son de baja resistencia.

Posteriormente se encuentra la Unidad Geotécnica 1 (Ug-1), la cual está conformada por una alternancia de tres tipos de tobas cuyas propiedades son muy similares entre sí, estos materiales son: Toba líticocrystalina riolítica (T tcr), Toba brechoide riolítica (T tbr) y Toba pumicítica (T tp).

En seguida yace la Unidad Geotécnica 2 (Ug-2), formada por una Ignimbrita riolítica (T igmr).

A continuación se ubica la Unidad Geotécnica 3 (Ug-3) conformada por cuatro tipos de tobas con características similares, estas son: Toba vítrea desvitrificada riolítica (T tvdr), Toba líticocrystalina desvitrificada riolítica (T tlcd), Toba vitrolítica latítica calcificada (T tvlla) y un Aglomerado (T agl).

Posteriormente la Unidad Geotécnica 4 (Ug-4) que corresponde a una Toba lítica dacítica calcificada (T tlda).

La Unidad Geotécnica 5 (Ug-5) se conforma de una Ignimbrita desvitrificada oxidada calcificada (T igmdv).

En la Unidad Geotécnica 6 (Ug-6) encontramos una Dolerita cloritizada (T Qdcl).

La Unidad Geotécnica 7 (Ug-7) es una Toba vitrocristalina riolítica (T tvcr).

En la Unidad Geotécnica 8 (Ug-8) se presenta una Ignimbrita riolítica vesicular calcificada (T igmrv).

Finalmente la Unidad Geotécnica 9 (Ug-9) se conforma de una Toba lítico cristalina (T tlcd).

Es necesario aclarar que el túnel de desvío se desarrolla totalmente dentro de las Unidades geotécnicas: Ug-1 (series de tobas) y Ug-2 (ignimbrita riolítica).

La familia de discontinuidades geológicas más importante para la Ug-1 está constituida por la pseudoestratificación, que se encuentra casi horizontal. Para la Ug-2 son familias casi verticales, formando planos casi ortogonales entre sí, ocasionando que esta Unidad se constituya en columnas. El relleno de las discontinuidades en ambas Unidades es arcilla y CaCO_3 .

1.3 Condiciones geotécnicas

Las Unidades Geotécnicas involucradas en la excavación del túnel, la Ug-1 constituida por una serie de tobas y la Ug-2 constituida por una ignimbrita riolítica, se clasifican como macizos rocosos de Clase III, es decir, tienen una calidad de roca media según Bieniawski (Bieniawski, Z. T. 1989), con un RMR (Rock Mass Rating) de 52 para la Unidad Geotécnica Ug-1 y de 59 para la Ug-2.

Los valores de los parámetros geomecánicos utilizados en los análisis corresponden a los valores promedio del macizo rocoso, obtenidos de las pruebas de laboratorio y considerando las características de las discontinuidades, utilizando el criterio de Hoek-Brown (Hoek, E. y Brown, E. T. 1988). Se empleó también para este fin el programa RocData v. 3.0 (Rocscience Inc. 2004a). Los parámetros Geomecánicos para los macizos rocosos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros Geomecánicos de los macizos rocosos

Unidad Geotécnica	c (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)
Ug-1	0,29	20	477
Ug-2	1,09	22	3326
Ug-3	0,40	22	578
Ug-4	0,32	28	2058
Ug-5	1,60	23	4377
Ug-6	2,88	28	11943
Ug-7	0,50	25	1009
Ug-8	1,22	22	4959
Ug-9	0,41	31	498

donde: c = cohesión; ϕ = ángulo de fricción interna; y E = modulo de elasticidad.

Se subraya que la estabilidad y el comportamiento de una masa rocosa dependen de la naturaleza de sus discontinuidades.

Para determinar la resistencia de las discontinuidades se realizaron pruebas de corte directo en las Unidades Geotécnicas involucradas en la estabilidad del túnel (Unidades Geotécnicas Ug-1 y Ug-2), en las que se determinó la resistencia máxima (de pico) y residual.

Estos parámetros de resistencia se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros Geomecánicos de las discontinuidades

Unidad Geotécnica	C_p (MPa)	ϕ_π (°)	ϕ_r (°)
Ug-1	0,30	28	18
Ug-2	0,41	30	20

donde: c_π = cohesión pico; ϕ_π = ángulo de fricción interna pico; y ϕ_r = ángulo de fricción interna residual.

1.4 Características del túnel

La parte principal de la obra de desvío está constituida por un túnel de sección portal de 15 m x 15 m, con un radio de la clave de 7,5 m y una longitud de 519,97 m. y no cuenta con pendiente. El trazo se conforma de una sección curva inicial que va del cadenamiento 0+000 al 0+080 y que corresponde al portal de entrada; posteriormente se encuentra un tramo recto que va del cadenamiento 0+080 al 0+450 y que representa la mayor parte del cuerpo del túnel y finalmente se encuentra otra sección curva que va del cadenamiento 0+450 al 0+519,97 y que corresponde al portal de salida.

Cabe mencionar, que a lo largo de casi todo el trazo del túnel, su clave se encuentra alojada en la Unidad Geotécnica 1 que corresponde a la serie de tobas y las paredes y el piso se ubican en la Unidad Geotécnica 2 que corresponde a la Ignimbrita riolítica. En la Figura 1 se presenta un esquema de la geometría del túnel de desvío.

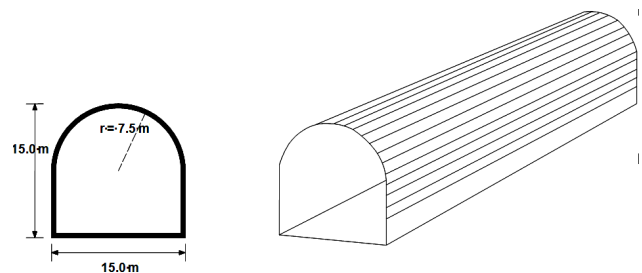


Figura 1. Túnel de desvío. Sección portal

2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

2.1 Presentación del problema

Utilizando las secciones geológico-geotécnicas en las que se encuentran indicados los diversos materiales, las estructuras geológicas correspondientes a contactos geológicos y fallas; la obra desvío y las excavaciones, se realizaron los análisis encaminados a evaluar la estabilidad y comportamiento del túnel de desvío para diferentes condiciones durante su excavación y de esta manera diseñar los tratamientos de la roca, necesarios para garantizar que la excavación sea estable tanto para la etapa de construcción como para la etapa de operación de esta obra.

Para el diseño de este túnel se consideraron dos alternativas. La primera consistió en un túnel ubicado relativamente cerca del cauce del río, donde en varias de las secciones de análisis se sitúa a la derecha de la falla 1 (respecto a la dirección del flujo del agua), mientras que en algunas otras la misma falla incide sobre el túnel. Por otro lado el túnel se encuentra dentro de la ignimbrita riolítica (Tigr) y la toba litocristalina riolítica (Tlcr), esta primera alternativa corresponde con la propuesta original del trazo del túnel de desvío, su ubicación se observa en planta y sección (sección del eje curvo) en las Figuras 2-3 respectivamente.

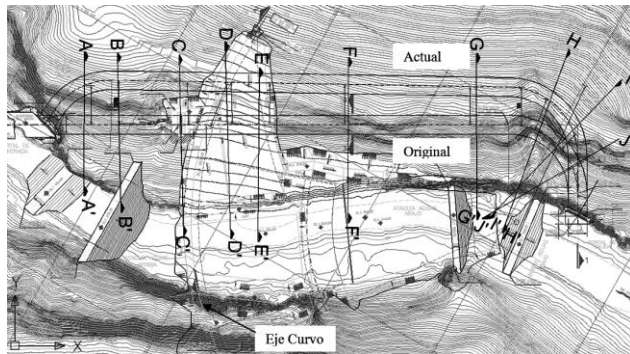


Figura 2. Planta con el trazo original y actual del túnel de desvío.

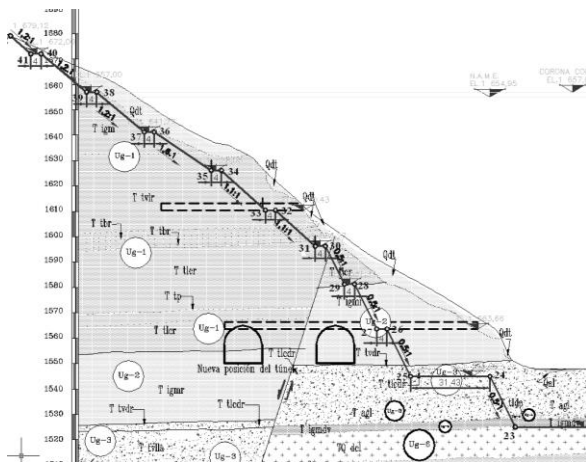


Figura 3. Sección del Eje Curvo.

También se efectuaron los análisis de estabilidad correspondientes a las excavaciones en las laderas y el cauce del río para alojar propiamente la cortina de la presa, de los cuales surgió el diseño de los taludes y bermas necesarios para garantizar la estabilidad general de la excavación. Los resultados de estos análisis implicaron que en la zona donde se ubicaba el túnel de Desvío (alternativa 1), se retiraría gran parte del material que servía como cobertura del mismo (Figura 3), lo cual probablemente generaría problemas importantes de estabilidad, sobre todo considerando condiciones críticas para el túnel tanto en las etapas de construcción y operación de la presa, en las que se vería sometido a un

estado de sobreesfuerzos y en consecuencia los tratamientos del macizo rocoso para la excavación resultarían con sobrecostos importantes.

Debido a lo anterior, se propuso una segunda alternativa de análisis que implica el cambio del trazo del túnel de desvío, alejándose del cauce del río como se observa en planta y sección en las Figuras 2 y 3 respectivamente, de esta manera el túnel fue trasladado hacia adentro del macizo con respecto a la opción original, evitando que éste se encuentre cerca de la Falla 1, buscando además que los portales de entrada y de salida se desarrollen de forma casi perpendicular a la ladera, con el objetivo de ganar cobertura en el techo del túnel desde el inicio. Como resultado de lo anterior se tiene una nueva configuración del trazo, la cual no tendrá problemas de cobertura, aún con las excavaciones necesarias para alojar la cortina de la presa, por el contrario tendrá una cobertura adecuada desde la excavación del portal de entrada.

Para el túnel de desvío en su alternativa 1, la falla 1 sigue una configuración y una orientación tal que en algunos tramos a lo largo del túnel incide en el trazo de este, haciendo latente la posibilidad de formación de bloques inestables dentro de la excavación en las zonas de concordancia por lo que el diseño del refuerzo para la estabilización de cuñas de esta alternativa podría incrementarse.

Considerando la nueva trayectoria del túnel de desvío (alternativa 2) se logró evitar en buena medida la presencia de la Falla 1 a lo largo del trazo del túnel, pues ésta queda a la derecha y debajo de la nueva ubicación, según la Figura 3. Esto es un aspecto importante ya que la falla no afectará el comportamiento de la excavación del túnel y entre otras cosas se reflejará también en reducir la probabilidad de formación de cuñas asociadas a esta falla.

2.2 Secciones de análisis

Como ya se comentó con anterioridad, a lo largo del trazo del túnel se consideraron varias secciones, a través de las cuales se generaron sus respectivas secciones geológico-geotécnicas y la información contenida en estas sirvió para el desarrollo de los análisis del comportamiento del túnel y diseño de tratamientos. De esta manera, se contó con 12 secciones (denominadas sección A a la J y portales de entrada y salida) trazadas desde el portal de entrada hacia el portal de salida y en ellas se identifican las dos alternativas del túnel de desvío. Por brevedad, en este documento, sólo se describen las secciones geológico-geotécnicas que se consideraron son las más importantes desde el punto de vista de la estabilidad del túnel de desvío.

La sección del Eje Curvo, pasa exactamente por el eje de la cortina, (Figuras 2 y 3) se observan los taludes y las bermas que se diseñaron a partir de los análisis de estabilidad para realizar la excavación donde se alojará la cortina; se aprecia la cantidad de material que será retirado al realizar las excavaciones y las afectaciones que tendría el túnel de la alternativa 1, una vez realizadas dichas excavaciones, ya que el material que le da la cobertura necesaria sería eliminado. Asimismo, se observa que sobre la alternativa 2 de túnel incide en

menor grado el efecto de la excavación. En esta sección también se aprecia que la ubicación de la alternativa 1 queda totalmente dentro de la Ug-2, mientras que para la alternativa 2 el túnel se encuentra tanto en la unidad Ug-1 y la Ug-2. La Falla 1 se ubica prácticamente entre las dos opciones.

En la sección F, aproximadamente a la mitad del tramo recto del túnel de desvío, (Figura 4) la distancia entre ambas alternativas de túnel se reduce, esto debido a que a medida que se avanzan hacia el portal de salida, las dos alternativas tienden a coincidir en dicho portal. Ahora la alternativa 1 prácticamente continúa en la Ug-2, la Falla 1 pasa por el eje vertical del túnel de desvío para esta opción, cortándolo de clave a piso casi por la mitad, lo que complica seriamente su estabilidad y los tratamientos para mejorarla serían importantes. Para la alternativa 2, el túnel queda casi totalmente dentro de la Ug-2, pero la clave continúa dentro de la Ug-1.

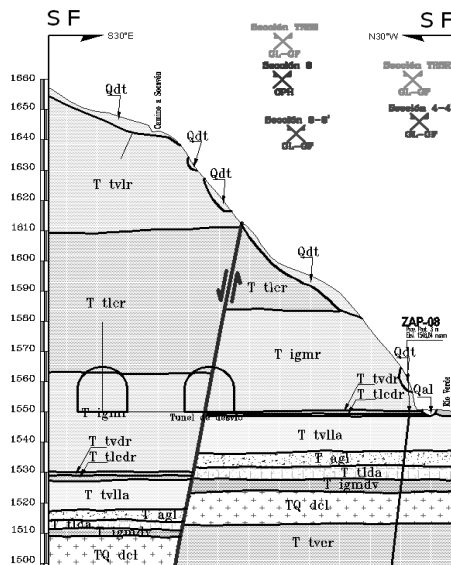


Figura 4. Sección F

Considerando cada una de las secciones y los resultados de análisis preliminares de estabilidad, se descartó la alternativa 1 de túnel debido a que en la mayoría de sus secciones geológicas geotécnicas es cruzada por las Fallas 1 y 2, y que además en un número importante de ellas no se cumple con la cobertura necesaria, ocasionando problemas importantes de inestabilidad.

3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR FORMACIÓN DE CUÑAS EN EL TÚNEL DE DESVÍO

3.1 Preliminares

Los análisis que se presentan en los incisos siguientes, corresponden a los realizados considerando el trazo modificado del túnel de desvío (alternativa 2), ya que como se comentó en el párrafo anterior, desde el punto de vista geotécnico resultaba más conveniente modificar el trazo del túnel de desvío, alejándolo del cauce.

En la excavación de túneles los problemas de inestabilidad frecuentemente son controlados por la presencia de discontinuidades tales como fallas, zonas de cizalla, planos de estratificación y grietas; la intersección de estas estructuras geológicas puede liberar bloques o cuñas que caerán o deslizarán por la superficie expuesta de la excavación. Debido a lo anterior es muy importante la correcta interpretación de las características geológico-estructurales en el macizo rocoso, seguido de un estudio de bloques y cuñas que pueden ser liberados al abrir la excavación; la identificación y visualización de ellos es la parte más importante de este tipo de análisis. Posteriormente se podrá evaluar la estabilidad de estos bloques y cuñas, así como el diseño del refuerzo para la estabilización de los mismos.

Los pasos a seguir para este tipo de análisis son los siguientes:

- Determinación de las características geológico-estructurales de los sistemas importantes de discontinuidades (echado promedio y dirección del echado).
- Identificación de cuñas o bloques potencialmente deslizables, y que pueden fallar por el techo, el frente o paredes de los túneles.
- Cálculo del Factor de Seguridad (F.S.) de las cuñas o bloques potencialmente deslizables.
- Determinación de la cantidad de refuerzo requerido para que el F.S. de las cuñas o bloques potencialmente deslizables alcance niveles aceptables de estabilidad.

El tamaño y forma de las cuñas potencialmente deslizables alrededor de un túnel dependen del tamaño, forma y orientación de la excavación; y también de la orientación de los sistemas principales de las discontinuidades.

En el análisis se determinan las cuñas máximas posibles que deberán tomarse en cuenta conservadoramente, ya que las cuñas formadas en el macizo rocoso estarán limitadas por la persistencia y espaciamiento de las discontinuidades.

Por otro lado, los tratamientos en el túnel deben ser suficientes para soportar todo el peso de las cuñas o bloques potencialmente inestables. Si se considera que la resistencia actuante es la residual; el F.S. debe ser mínimo 1,3 para túneles temporales y 1,5 para túneles permanentes.

Para analizar la estabilidad del trazo corregido del túnel de desvío (alternativa 2), por formación de cuñas a lo largo del túnel debido a la presencia de las estructuras geológicas, se utilizó como base la información contenida en todas las secciones geológicas geotécnicas, así como la información geológica obtenida en el socavón 1 perforado en la ladera de la margen izquierda.

Se revisó la posible formación de cuñas con los respectivos sistemas de discontinuidades en todas las secciones señaladas en la Figura 2, pero por brevedad, para este documento el análisis se divide en tres partes considerando el cambio de la orientación de la excavación. En la primera se presenta el análisis de una sección representativa del tramo del túnel cercano al portal de entrada, en la segunda se presenta el análisis

de una sección representativa del tramo recto del túnel de desvío y en la tercera se presenta el análisis de una sección representativa del tramo del túnel cercano al portal de salida. Para el análisis por cuñas se utilizó el programa Unwedge (Rocscience Inc. 2004b).

3.2 Tramo del túnel cercano al portal de entrada

Basados en la metodología descrita en el inciso anterior, para diseñar los tratamientos en el tramo del túnel cercano al portal de entrada, se utilizó el estereograma que contiene las principales discontinuidades geológicas en la zona de influencia de este tramo del túnel, con el cual se determinaron las posibles intersecciones que generan todas las cuñas potencialmente deslizables lo que permite conocer cuál de ellas debe considerarse para el diseño de los tratamientos a la roca y consecuentemente su correcta estabilización.

Las discontinuidades y el estereograma utilizado en el análisis que sirvieron de base para generar los tratamientos de la roca en la zona del portal de entrada se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 5. Dicho estereograma presenta cuatro sistemas de discontinuidades.

Tabla 3. Discontinuidades presentes a lo largo del túnel

Discontinuidades	Descripción
J1	Estratificación S1
J2	Fallas F1
J3	Sistema f1 cad. 70 a 98 soc.
J4	Sistema f2 cad. 70 a 98 soc.

A todas las discontinuidades se les asignaron los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio a partir de las pruebas de corte directo. En general, para los análisis se emplearon los parámetros de resistencia correspondientes a las discontinuidades de la Tabla 2.

Se revisaron todas las combinaciones posibles considerando cada una de las discontinuidades, por brevedad sólo se presentan los resultados para la cuña máxima probable (Fig.6).

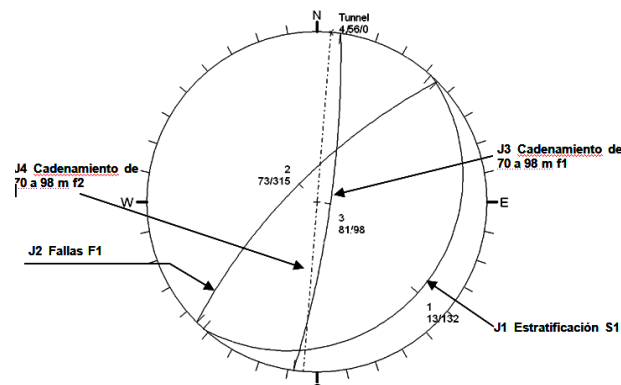


Figura 5. Estereograma para el tramo del portal de entrada

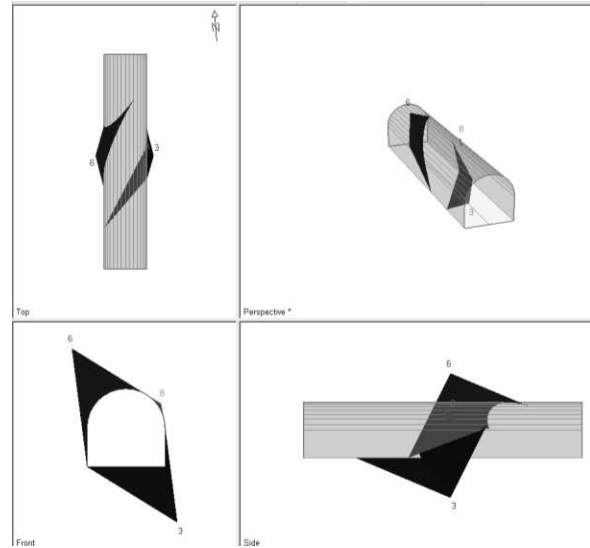


Figura 6. Cuñas resultantes para el tramo del portal de entrada del túnel

La cuña resultante de la combinación de las discontinuidades J2, J3 y J4 de la Tabla 3 (en clave y pared izquierda) resultó ser la cuña máxima, por lo cual se consideró como la cuña de diseño.

Del análisis realizado se determinó un Factor de Seguridad (F.S.) inferior a 1,5, por lo que fue necesario aplicar un tratamiento con anclas de 1 1/2" de diámetro y 6,0 m de longitud en un patrón de 2,0 m x 2,0 m De esta manera se alcanzó un F.S. de 1,56; lo cual se consideró admisible.

3.3 Tramo recto del túnel

De la misma forma que para el caso del tramo del túnel cercano al portal de entrada, se llevaron a cabo los análisis para definir los tratamientos en el tramo recto del túnel.

Las discontinuidades y el estereograma utilizado para el análisis del tramo recto del túnel se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 7. Dicho estereograma muestra cuatro discontinuidades, a partir de las cuáles se determinó la cuña de diseño para este tramo.

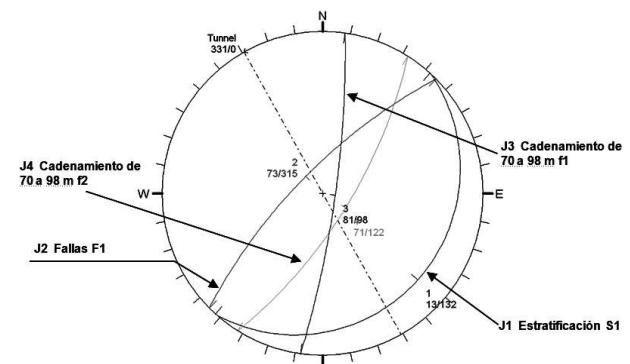


Figura 7. Estereograma utilizado para el análisis del tramo recto del túnel.

En este caso la cuña máxima probable se muestra en la Figura 8. La cuña resultante por la combinación de las discontinuidades J1, J2 y J3 (en clave y pared derecha) requiere un tratamiento consistente en anclaje de 1 1/2" de diámetro y 6,0 m de longitud en un patrón de 2,0 m x 2,0 m, con lo cual se alcanza un F.S. de 2,42, lo cual se consideró admisible.

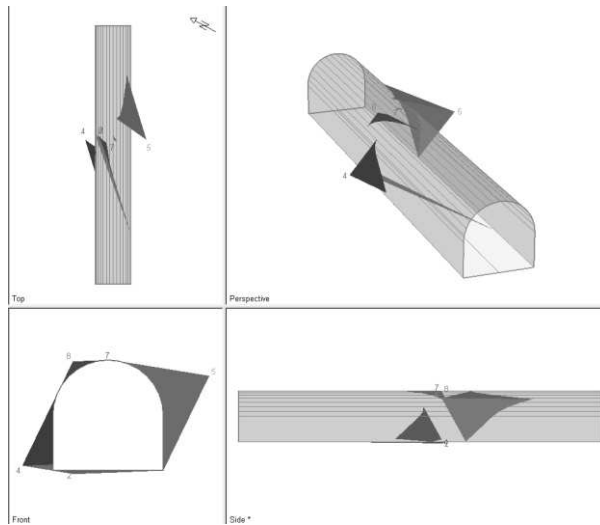


Figura 8. Cuñas resultantes en el tramo recto del túnel

3.4 Tramo del túnel cercano al portal de salida

Para el caso del tramo del túnel cercano al portal de salida, las discontinuidades y el estereograma utilizado se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 9. Dicho estereograma presenta cuatro discontinuidades, a partir de las cuáles fue posible determinar la cuña de diseño.

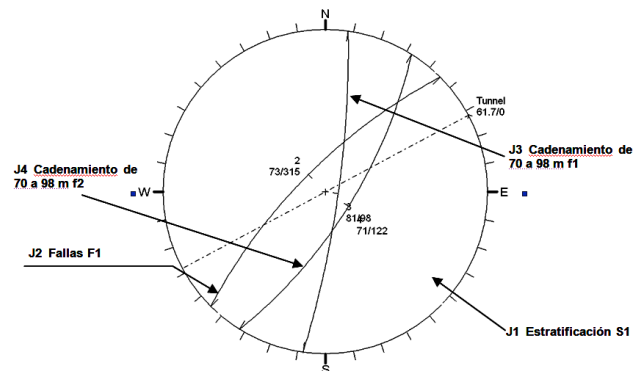


Figura 9. Estereograma utilizado en el tramo del portal de salida del túnel

La cuña máxima resultante formada por la combinación de las discontinuidades J1, J2 y J3, en la pared izquierda y en la clave (ver la Figura 10), requirió un refuerzo constituido por anclas de 1 1/2" de diámetro y 6,0 m de longitud, colocado formando un patrón de 2,0 m x 2,0 m. El F.S. alcanzado tuvo un valor de 2,43, lo cual se consideró admisible.

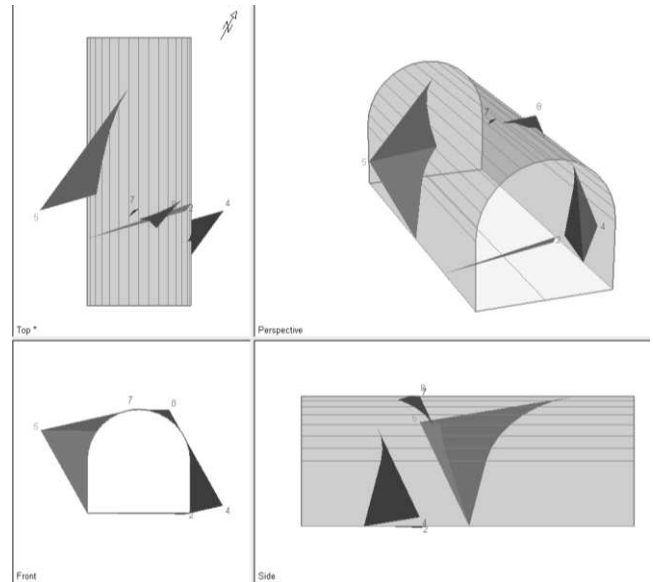


Figura 10. Cuñas resultantes por la combinación de discontinuidades en el tramo del portal de salida.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE TRATAMIENTOS

Una vez que se ha realizado el análisis de estabilidad de los túneles en sus dos alternativas de trazo, se determina que la mejor opción desde el punto de vista geotécnico es el trazo 2. Se enfatiza la importancia de un análisis preliminar de estabilidad considerando las condiciones geológicas-estructurales y el anteproyecto de las obras. En este caso dicho análisis permitió seleccionar una de las alternativas y un diseño racional de los tratamientos.

Considerando la alternativa seleccionada se determinaron las características geológico estructurales de las discontinuidades a lo largo del túnel, identificando las cuñas o bloques potencialmente deslizables, se evaluaron los factores de seguridad para estas cuñas en los tramos de los portales de entrada y salida y tramo recto del túnel; de esta manera fue posible generar las recomendaciones de tratamientos a la roca a lo largo del túnel de desvío. Dichos tratamientos consisten en la colocación de concreto lanzado, anclaje, drenaje y marcos metálicos.

4.1 Tratamientos en todo el túnel excepto en zonas cercanas a los emportalamiento y cruce de fallas

Los tratamientos son los siguientes (Fig. 11):

- Revestimiento en clave y paredes con concreto lanzado $f_c = 24,52 \text{ MPa}$ (250 kg/cm^2) de 25 cm de espesor, reforzado con malla electrosoldada 6/6-10-10 y fibras metálicas

- Anclas de fricción de 1 1/2" de diámetro de varilla corrugada de 6 m de longitud @ 2,0 m en barrenos de 3" de diámetro, fijados con mortero de cemento de $f_c = 19,6 \text{ MPa}$ (200 kg/cm^2). En su extremo y en contacto con la roca colocar placa roscada al ancla de 15 x 15 cm por 1,25 cm de espesor.

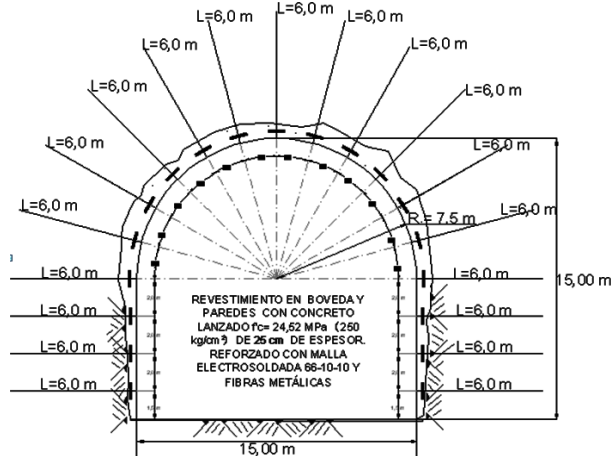


Figura 11. Tratamientos propuestos a lo largo del túnel, excepto en emportalamientos y cruce con fallas geológicas. Sección de anclaje y concreto lanzado. Secciones @ 2,0 m

4.2 Tratamientos en zonas de emportalamiento y del cruce de las fallas.

Es común en la práctica considerar marcos de acero colocados a separaciones máximas de 1 m hasta superar la zona de roca descomprimida, lo que deberá tomarse en cuenta para este tramo.

Los siguientes tratamientos (Fig. 12) corresponden a las zonas de emportalamiento (a partir de la cara del talud hasta 20 m del túnel) y del cruce de las fallas (10 m antes y 10 m después de la falla). Deberá verificarse en campo.

- Marcos metálicos de IR 12" x 12" @ 1,0 m

Los marcos deberán ir sujetos a la roca con 4 anclas de 1 1/2" de diámetro y 6 m de longitud, soldadas al perfil del marco. El desplante de los marcos deberá ser en concreto de regularización apoyado en roca in situ.

- Revestimiento en clave y paredes con concreto lanzado $f_c = 24,52 \text{ MPa}$ (250 kg/cm^2) de 15 cm de espesor, reforzado con fibras metálicas. El tratamiento es selectivo previo a la colocación de marcos.

- Anclas de fricción de 1 1/2" de diámetro de varilla corrugada de 6 m de longitud @ 2,0 m en barrenos de 3" de diámetro, fijados con mortero de cemento de $f_c = 19,6 \text{ MPa}$ (200 kg/cm^2). En su extremo y en contacto con la roca colocar placa roscada al ancla de 15 x 15 cm por 1,25 cm de espesor.

4.3 Drenaje

Las recomendaciones del drenaje son (Figura 13):

- Barrenos de drenaje largo de 1 1/2" y 6,0 m de longitud

- Barrenos de drenaje corto de 1 1/2" y 1,0 m de longitud, con una inclinación de 10° respecto a la horizontal, @ 2 m en las paredes o 15° en la clave, con tubo de PVC. El arranque de la primera línea es a 1,5 m del piso del túnel.

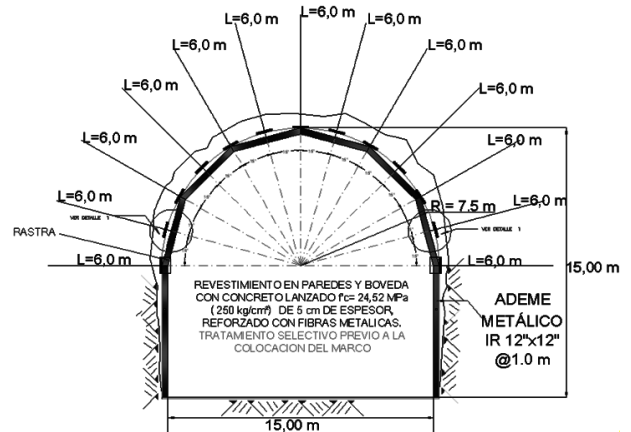


Figura 12. Tratamientos para las zonas de emportalamiento y cruce con fallas. Marcos metálicos.

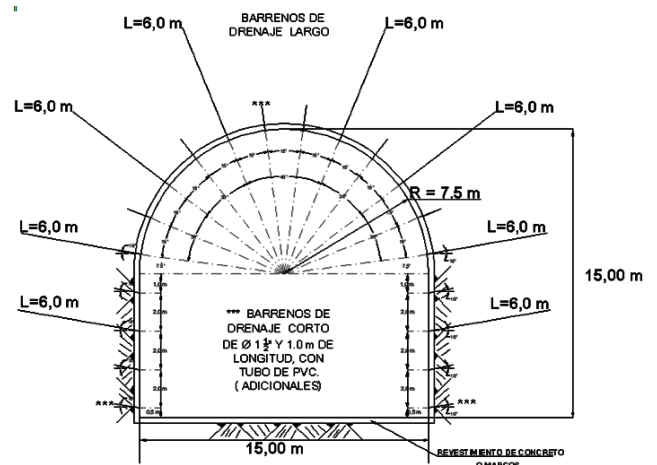


Figura 13. Abanico de drenaje. Secciones a cada 4,0 m en todo el túnel.

REFERENCIAS

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, Inc.
- Hoek, E. y Brown, E. T. (1988). *The Hoek-Brown failure criterion. A 1988 update*. Rock engineering for underground excavations. Proc. 15th Canadian Rock Mechanics Symp. Curran Ed. University of Toronto.
- Rocscience Inc. (2004a). *RocData. Rock mass, soil mass and discontinuity Strength Analysis*. Rocscience Inc. Geomechanics Software and Research. Software tools for rock and soil.