

Métodos probabilísticos en discontinuidades para la estabilidad de los túneles y semitúneles viales de Karkatera-Abancay

Probabilistic methods in discontinuities for the stability of road tunnels and half-tunnels of Karkatera-Abancay

José A. Cárdenas_Catalán^A, Celinda Alvarez_Arias^B, Aydeé Kari_Ferro^C, Nora G.

Echegaray_Peña^D, Rosa Huaraca_Aparcol^E y Niki F. Flores_Pacheco^F

0000-0002-1155-0943^A, 0000-0003-1585-4001^B, 0000-0001-7598-7450^C y 0000-0001-8664-1535^D 0000-0003-4493-7754^E 0000-0002-2772-0951^F

(Recepción: 3/10/2022 y aceptación 10/11/2022)

Resumen— Durante décadas, las estructuras en roca fueron diseñadas en base a métodos empíricos, basados en la experiencia profesional, se tendía a sobrestimar los sistemas de soporte con el consiguiente incremento de costos, sin dar interés a la resistencia intrínseca de la roca y se aplicaba a casos similares. El desarrollo del estudio de la Mecánica de Rocas ha alcanzado niveles altos que han contribuido a solucionar problemas complejos en macizos rocosos de variadas condiciones geomecánicas, permitiendo construir obras amplias en macizos de resistencia baja como túneles subterráneos de gran longitud, construcciones subterráneas, despensas de alimentos, refugios subterráneos entre otros, para aprovechar el espacio subterráneo, especialmente en países de alta densidad poblacional. El objetivo en los Túneles Viales es de buscar el sostenimiento adecuado para su estabilidad, mediante un estudio probabilístico. En la excavación de los túneles de Karkatera, el uso de explosivos dosificados permitió realizar las obras en corto tiempo, se trató de provocar el menor daño a los macizos rocosos del entorno con cortes regulares y controlados que redujeron la necesidad de refuerzos, pero aun así el macizo rocoso posee su comportamiento gobernado por las discontinuidades caracterizadas por condiciones como la orientación, persistencia, espaciamento, rugosidad, etc. que definen el grado de fracturamiento del macizo rocoso y su resistencia al corte. La presente investigación estudió los parámetros geométricos de las familias de discontinuidades haciendo uso de métodos probabilísticos para evaluar la probabilidad de ruptura de las estructuras en estas obras civiles con resultados positivos, el cual permita proponer métodos de estabilización adecuados.

Palabras clave: estabilidad, geometría de discontinuidades, método probabilístico, resistencia al corte

Abstract— For decades, rock structures were designed based on empirical methods, based on professional experience, support systems tended to be overestimated with the consequent increase in costs, without giving interest to the intrinsic resistance of the rock and applied to Similar cases. The development of the study of Rock Mechanics has reached high levels that have contributed to solving complex problems in rock masses of varied geomechanical conditions, allowing the construction of extensive works in low resistance massifs such as long underground tunnels, underground constructions, food pantries, underground shelters among others, to take advantage of underground space, especially in countries with high population density. The objective in the Road Tunnels is to seek adequate support for their stability, through a probabilistic study. In the excavation of the Karkatera tunnels, the use of dosed explosives allowed the works to be carried out in a short time, an attempt was made to cause the least damage to the surrounding rock masses with regular and controlled cuts that reduced the need for reinforcements, but even so The rock mass has its behavior governed by discontinuities characterized by conditions such as orientation, persistence, spacing, roughness, etc. that define the degree of fracturing of the rock mass and its resistance to cutting. The present investigation studied the geometric parameters of the families of discontinuities using probabilistic methods to evaluate the probability of rupture of the structures in these civil works with positive results, which allows proposing adequate stabilization methods.

Keywords: stability, stability geometry, probabilistic method, shear strength.

- A. José A. Cárdenas_Catalán, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, jcatalano@unamba.edu.pe
B. Celinda Alvarez_Arias, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, calvarez@unamba.edu.pe
C. Aydeé Kari_Ferro, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, akari@unamba.edu.pe
D. Nora G. Echegaray_Peña, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, nechegaray@unamba.edu.pe
E. Rosa Huaraca_Aparco, Universidad Nacional José María Arguedas rhuaraca@unajma.edu.pe
F. Niki F- Flores_Pacheco, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, nflores@unamba.edu.pe

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como objetivo principal garantizar un adecuado sostenimiento, previo un estudio geomecánico o de base en una clasificación geomecánica RMR de Bieniawski, Q de Barton, RQD, Deere, pruebas hechas en laboratorio como las propiedades físicas y mecánicas, y caracterización del macizo rocoso, considerando la geología local del área; se busca un determinado sostenimiento para los túneles viales Karkatera para corroborar con un estudio usando métodos probabilísticos aplicados a la geotecnia, así también el método de simulación Monte Carlo y el método FOSM. El método de estimación de puntos propuesto por Rosenblueth (1975), mediante datos medios y vectoriales, nos brinda un análisis de confiabilidad y rotura de lo planteado en el sostenimiento.

Según [1] Los problemas de inestabilidad en laderas rocosas y cavidades se rigen directamente por las características de las familias de discontinuidades, que son revisadas por la geotécnica de pendiente. [2] las superficies inalteradas de las paredes de una discontinuidad tienen una resistencia similar a la roca intacta, de tal manera que la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (JCS) se puede obtener directamente por medio de ensayo de compresión realizadas a los bloques de roca que conforman las paredes. También señalan que, en función del espesor del material de relleno, puede alterar por completo o controlar la resistencia al corte y la conductividad hidráulica de la discontinuidad. Según [3], la rugosidad de la discontinuidad afecta a la resistencia al corte, que está representado por CCI (coeficiente de rugosidad de la discontinuidad) presente en la resistencia de la ecuación de discontinuidad, que muestra que el ángulo de discontinuidad pico de fricción es directamente proporcional a este parámetro, y, por lo tanto, el grado de rugosidad, de acuerdo con [4]. En la mecánica de rocas, la proyección estereográfica se aplica a la caracterización de las orientaciones de las discontinuidades del macizo rocoso y sirve para el análisis de estabilidad de taludes y obras subterráneas. [5] es ampliamente aceptado y ha sido aplicado en un gran número de proyectos a nivel mundial, Assís (2001), el criterio de Mohr-Coulomb se aplica por lo general a los suelos, algunos tipos de roca intacta y discontinuidades planas y lisas, o aquellas controladas por el relleno.

El estudio de estas tensiones no es parte de los objetivos de esta investigación. Sin embargo, para una mejor comprensión de esta área de estudio, es de importancia fundamental conocer para sugerir la forma de excavaciones subterráneas, tal como [6] señala.

[7], en sus trabajos de construcción de túneles para dimensionamiento de soportes, no introdujo su metodología como una clasificación, pero estableció criterios de

parámetros geológicos, grado de fracturamiento del macizo, parámetros asociados a las características dimensionales de la excavación subterránea y su posición con relación al nivel de agua. Cecil (1970), sostiene que, si se considera la metodología de Terzaghi como una clasificación, ésta es muy general para permitir una evaluación objetiva de la calidad de la roca y no proporciona información cuantitativa sobre las propiedades de los macizos rocosos. Sin embargo, su metodología ha contribuido notablemente para los proyectistas de túneles, en las décadas pasadas, con criterios para la ejecución de proyectos. La Clasificación y valoración de los parámetros individuales del índice Q Barton y Grimstad presentados en el anexo y además de las observaciones complementarias hechas por [8], [9], El ajuste propuesto consiste, en la modificación del valor original del parámetro RQD en cierto porcentaje por llevar en cuenta la influencia de la meteorización, tensiones "in situ" e inducidas, influencia de la orientación del rumbo y buzamiento en la excavación y efectos de la voladura. Peck en 1969 propuso una metodología, conocida como Método Observacional, que preveía ajustes en el proyecto, durante su ejecución, de acuerdo con cambios de su comportamiento. geotécnicas [10]. De esta forma, para Assís et al., (2001), los métodos estadísticos y probabilísticos aparecen como una alternativa sistemática de incorporar la variabilidad de cargas y parámetros en el proyecto y luego calcular el riesgo de ruptura o la confiabilidad de estas estructuras.

Para Levine et al., (1998), la mayoría de los datos presentan una tendencia diferente agrupar o concentrar alrededor de un punto central. De esta forma, para un conjunto de datos En particular, generalmente se hace posible seleccionar un valor típico o medio para describir todo el conjunto. Harr (1987) Tal valor descrito típico es una medida de localización o tendencia central. A continuación, se presentarán tres tipos de promedios generalmente utilizados como medida de tendencia central, que son: la media aritmética, la mediana y la moda. [11] Este trabajo implicó simulaciones directas de problemas probabilísticos, con el propósito de estudiar la difusión aleatoria de neutrones en material inestable.

De acuerdo con [12] fue utilizado inicialmente en proyectos de la industria del acero, donde se trabajó con el valor medio y la desviación estándar para la resistencia X y la carga Y, El truncamiento de la función de expansión de la serie de Taylor forma la base de estos métodos, [13], se observa que esta distribución puede asumir diferentes formas, como se ve en el trazado de las distribuciones. Según [14], realizó una amplia revisión bibliográfica y comparativa de los modelos elásticos que consideran la no linealidad del comportamiento tensión-deformación de la roca intacta. [15] consideran al soporte como uno de

los “ítems” más importantes en una excavación subterránea, en la tesis enfoca los aspectos teóricos y técnicos del sistema de soporte con pernos de anclaje. [16] desarrolló un modelo probabilístico tridimensional para la previsión de la distribución de discontinuidades en el interior del macizo rocoso fracturado. Se aplicó herramientas estadísticas y probabilísticas en el estudio del comportamiento del macizo rocoso para sus discontinuidades, las que pueden ser caracterizadas por condiciones como: número de familias, la orientación, la persistencia, el espaciamiento, la rugosidad de las paredes, el relleno, etc.

[17] recomienda: dentro de la metodología planteada para la aplicación de la geomecánica al minado subterráneo, la preparación de la información básica juega un rol importante. Castresana (2016) concluye que, para un mejor análisis de sostenimiento y un mejor acercamiento a la realizada, en grandes obras como las analizadas en el presente trabajo, se debe realizar un análisis geológico más detallado. A su vez Burgos (2015) recomienda: Ante las limitaciones de los softwares actuales de modelamiento numérico en el análisis de pernos de roca, conviene plantear una nueva formulación que se adapte a los requerimientos básicos del diseño de este tipo de elementos. Corimanya (2003) recomienda: La utilización de “softwares” especializados en Mecánica de Rocas y en Perforación Voladura de Rocas son de suma importancia, ya que agiliza cálculos tediosos y complicados para el análisis de estabilidad del macizo rocoso y análisis de mallas de perforación y disparos. Rodríguez (2003) La valoración del macizo rocoso mediante los índices RMR lo consideran de calidad “media” tipo III, si bien el índice Q lo enmarca dentro del tipo “malo” como También [17], Dado a la variabilidad de los resultados de los valores de RMR o SMR entre las diferentes familias de discontinuidades que se pueden encontrar en una zona; para la elaboración de un mapa de susceptibilidad, es recomendable utilizar los valores mínimos, es decir los valores críticos [18] a su vez [19] recomienda: La metodología utilizada para el modelamiento numérico utilizando la desratización del modelo de dilución, probó representar de buena forma la evidencia empírica, [20].

Determinar la influencia de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso de los túneles y semitúneles de Karkatera, para prever el comportamiento geotécnico del macizo en las obras civiles excavadas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se empleó métodos descriptivos y experimentales en algunos casos para lo cual es el estudio “Determinación por métodos probabilísticos en discontinuidades para la estabilidad de los túneles y semitúneles viales de Karkatera- Abancay, Apurímac” y

así determinar una buena estabilidad en los túneles, que servirá como información para otro tipo de trabajos similares en esta región que no se aplican en este tipo de trabajos.

Los Túneles se encuentran entre las comunidades de Karkatera y Occopata, distrito de Abancay, provincia Abancay, departamento Apurímac; a una distancia de 25, 6 km. en dirección NW desde la ciudad de Abancay. La vía que une hacia los túneles es carretera afirmada, a una altitud promedio de 3010 msnm, enmarcada entre las coordenadas UTM: N = 8 494 832 y E = 718 827. Los trabajos realizados comprendieron la ejecución de investigación de campo, trabajos en laboratorio y labores en gabinete, utilizando todos los criterios definidos en el capítulo I de esta tesis.

En Campo: Se realizaron las siguientes Actividades: Revisión y análisis de información disponible.

Inspección general de la zona de estudio. Levantamiento topográfico de los túneles y área de influencia. Estudio y levantamientos geológicos- Geomorfológicos de las labores en estudio. Mapeos geotécnicos en las estructuras rocosas subterráneas. Determinación de dominios estructurales. Toma de muestras rocosas para la ejecución de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas. Recopilación adicional (planos, Informes etc.) de interés para el estudio. Revisión bibliográfica de los métodos estadísticos con el fin de controlar mejor esta estadística de la herramienta. Los mecanismos de falla presentes en macizos rocosos también fueron revisados con el fin de definir que se estudió. Al mismo tiempo, se estudiaron modelos estadísticos de representación vectorial de las orientaciones de las discontinuidades con el fin de elegir la que es más simple y más fiable para calcular el buzamiento y Dip dirección media del medio. Al ejecutarse las excavaciones subterráneas en los túneles viales de Karkatera se alteró el estado natural de equilibrio tensional existente en el macizo rocoso generándose una redistribución de esfuerzos para retornar a su estado natural, en ese proceso se producen deformaciones en la roca circundante a la excavación, si la resistencia del macizo rocoso es menor que las deformaciones, este comienza a ceder hasta llegar a la ruptura. En todo el proceso está involucrado, las condiciones de las discontinuidades y el tamaño de la excavación.

El trabajo de investigación también, tiene como fin contribuir como aporte al desarrollo de la ingeniería de macizos rocosos dentro del ámbito de la región Apurímac y del país, en las Escuelas Académicas Profesionales de Ingeniería de Minas y Civil de nuestras universidades y como objetivo personal obtener el Grado Académico de Maestro en Geomecánica y Geotécnica de la Universidad

Nacional del Altiplano.

Descripción detallada por objetivos específicos

El objetivo final de esta tesis es comparar los resultados del análisis determinístico y probabilístico de la estabilidad de los túneles viales de Karkatera, debido a la variabilidad natural de los parámetros geométricos de las discontinuidades (por buzamiento y dirección de buzamiento) presente en el macizo rocoso.

Determinar la influencia de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso de los túneles y semitúneles de Karkatera, para prever el comportamiento geotécnico del macizo en las obras civiles excavadas. Analizar el comportamiento plástico en el entorno de las superficies de las excavaciones en los túneles y semitúneles de Karkatera, para determinar la resistencia al corte de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Utilizar herramientas estadísticas, probabilísticas y computaciones para simular situaciones desfavorables en zonas plásticas de las excavaciones de los túneles y semitúneles de Karkatera que afectan la estabilidad de las obras.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios de esta tesis fueron desarrollados por medio de casos reales de los túneles viales de Karkatera, para el cual se realizó un trabajo de investigación de pre grado en el año 2009; para ello fue necesario seguir haciendo trabajos de campo, pruebas de laboratorio y trabajos de gabinete, utilizando técnicas adecuadas pertinentes al estudio. Los trabajos geotécnicos proporcionan información concerniente con los modelos geológicos y geomecánicos, toda esta información fue necesaria para luego ser integrada en modelos matemáticos.

Los túneles se encuentran ubicadas en el ámbito geográfico de las comunidades de Karkatera y Occopata, distrito de Abancay, departamento de Apurímac, a una distancia de 25.6 km. de la ciudad de Abancay, la carretera es de material afirmada con dirección NW, a una altitud promedio 3100 msnm, con coordenadas UTM: N=8494832, E=718827; la roca aflorante en este tramo tiene una secuencia de geología local correspondiente al grupo Copacabana, con una potencia estimada de 2000 m, constituido por rocas calizas de color predominante gris claro, con alternancia de lutitas de coloración negras a grises oscuras Saez, (2010).

De acuerdo al plano topográfico de la zona de estudio, donde se encuentran los túneles viales de Karkatera presenta curvas de nivel que muestra una morfología accidentada y de fuertes pendientes en sentido noroeste a la zona de estudio, (Plano topográfico), (Plano geológico), (Plano geomecánico) y secciones de corte Plano

TABLA 1. Estructuras subterráneas de los túneles de Karkatera

Estructura	Altura (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	Pendiente (%)
Túnel 1	5.5	4.5	96.00	155.00	2
Túnel 2	5.5	4.5	120	140.00	2
Semi túnel	5.5	2.5	180	-	2

Para la caracterización de la masa rocosa en el área de estudio donde se ubican los túneles I, II y el semitúnel, se realizó previamente el reconocimiento de la zona en estudio, luego el levantamiento topográfico y posteriormente un sondeo geológico superficial, acciones que de los cuales se tomó la decisión de hacer el seccionamiento por tramos de 20 m. en el túnel I y de 20 m. al inicio y 30 m al final del túnel II, tramos que de acuerdo al comportamiento de las discontinuidades y fallas ameritaban tal acción.

El mapeo geotécnico se llevó a cabo utilizando el método directo en toda la longitud de los túneles I y II, secciones transversales de 20.00 m. en el túnel I y, 20.00 m. y 30.00 m. en el túnel II; asimismo, el seccionamiento de 30.00 m en el semitúneles. Mediante este método, se realizaron mediciones sistemáticas de las discontinuidades y fallas, cubriendo íntegramente las mediciones y caracterización de los dos túneles Hidalgo, (2002).

Durante el mapeo geomecánico de la exposición de rocas subterráneas, también se registraron en campo las discontinuidades principales, las que fueron registradas en los planos geológicos y geotécnicos estructurales (Alonso, 2002).

Mapeo de las discontinuidades y sus caracterizaciones. Durante las mediciones geotécnicas de los túneles Karkatera, el personal técnico de apoyo participó en el mapeo de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso aflorantes en los túneles I y II, estos métodos son los convencionales y comprenden las líneas de detalle de los tramos determinados en cada túnel, la asignación caracterizaba las discontinuidades según su buzamiento ("Dip") y dirección de buzamiento ("Dip Direction"), de acuerdo con las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de las Rocas ("International Society for Rock Mechanics – ISRM, 2007"). El mapeo de las discontinuidades presentes en los túneles I II y su caracterización estructural se ejecutaron continua, sistemática y detalladamente en cada discontinuidad, (Figura 1).



Figura 1. En la imagen de la izquierda se muestra el Túnel II en toda su longitud, y en la imagen de la derecha se está realizando la medición de mapeo geomecánico de las discontinuidades.

Figura 1. En la imagen de la izquierda se muestra el Túnel II en toda su longitud, y en la imagen de la derecha se está realizando la medición de mapeo geomecánico de las discontinuidades.

Los datos obtenidos de la caracterización del túnel I, correspondiente a la familia 1, este cuadro es la forma del procedimiento como se llevó a cabo la caracterización del mapeo geomecánico de campo a gabinete. La caracterización completa de las discontinuidades presentes en los túneles I, II y semitúneles. El análisis de datos se realizó de acuerdo a dos líneas de trabajo definidas al inicio del estudio. La primera línea de investigación estudia el problema de la estabilidad de las cuñas en túneles por medio de un enfoque determinista, mientras que la segunda línea estudia el mismo problema por un enfoque probabilístico.

El enfoque determinista, usando valores medios de las características presentes en el problema objeto de estudio, es decir, sin la variabilidad estudio de los valores previamente conocidos de tales variables. Por lo tanto, estos valores medios se obtienen a partir de la simple adquisición o por la media aritmética de las variables conocidas del problema bajo los valores de estudio. El enfoque probabilístico, a diferencia del determinista considera la variabilidad natural de los valores de los parámetros actuales en cuestión, por la desviación y / o variación estándar. Por lo tanto, se requiere un mayor número de valores de estas variables para la determinación de la desviación estándar. Definida la Línea de estudio, fue necesaria la determinación de los valores de las variables que intervienen en el problema de dos vertientes, una con datos promedio y otras con datos vectoriales. Posteriormente, se realizó la obtención de la desviación estándar para los datos medios y vectoriales. Se decidió por el fraccionamiento de los túneles en tramos de 20 m y 30 m y de estos definidos para los datos medios y/o vectoriales, los valores de las orientaciones de las discontinuidades a seguir, fue seleccionado el tramo que mejor describiese el

comportamiento de las orientaciones de las discontinuidades existentes en cada túnel estudiado (Carvalho, 2003).

La selección del tramo más representativo se realizó por estudios del grado de dispersión de las familias de discontinuidades presentes en cada sección, en relación con todos los existentes a lo largo de las familias del túnel. Este estudio consistió en la determinación de las orientaciones de las familias de discontinuidades contenidas en las secciones o tramos cada 20 m, en el túnel I y, de 20 m y 30 m para el túnel II; para el semitúnel la sección fue de 30 m. Después se calcula la determinación de la desviación estándar de los tramos distintamente, de estos desvíos estándar será seleccionado el tramo con menor grado de dispersión, finalmente fue definida la división del túnel en tramos de 20 m. y 30 m. [22].

En los análisis de estabilidad de las cuñas, se optó por asumir el valor de la cohesión de las discontinuidades de los túneles como igual a cero. De esta forma, fue despreciada la influencia favorable de este parámetro en las fuerzas resistentes al deslizamiento de las cuñas inestables (tabla 2).

TABLA 2. Ángulo de fricción de las discontinuidades de los túneles I y II Karkatera.

Estructura		φ (Grados) Promedio
Túnel	Tramo	
T-I	0-96	30°
T-II	0-40	30°
T-II	40-132	30°

El resultado de los cálculos del ángulo de fricción de las discontinuidades de los túneles I y II se muestra en la Tabla, donde se presentan los valores medios del ángulo de fricción [20]. Inicialmente se utilizarían todos los parámetros de las familias de discontinuidades: las orientaciones ("Dip" y "DipDir"), las cohesiones y los ángulos de fricción de las tres familias de discontinuidades presentes en cada túnel. Sin embargo, el método probabilístico de Rosenblueth requiere 2^n combinaciones de los datos de entrada, así, de acuerdo con la pretensión inicial tendríamos 2^{12} combinaciones resultando en 4.096 cálculos para cada tramo de túnel y cada tipo de datos trabajados medios o vectoriales, llegando al final de los estudios con 294.912 cálculos realizados. Debido al elevado número de entradas manuales en el programa Unwedge, se optó por trabajar sólo con los parámetros "Dip" y "DipDir" de cada familia, ahora 64 (2^6) cálculos se realizaron por trecho, haciendo 4.608 cálculos en total. presenta el número total de cálculos probabilísticos realizados en los túneles I y II de Karkatera y la cantidad de orientaciones asignadas en los túneles, (Tabla 3).

TABLA 3. Cantidad de datos por túnel y número de cálculos realizados.

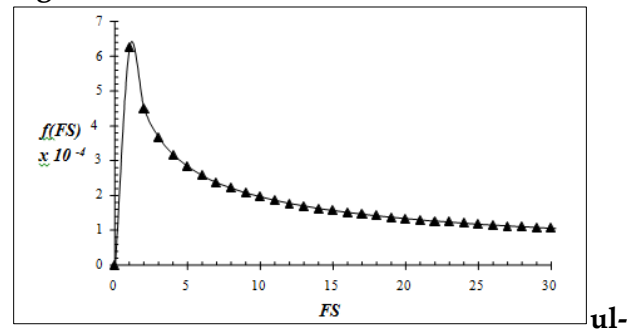
Estructura	Trecho (m)	N° de Orientaciones Por Familia			N° de Orientaciones
		Familia 1	Familia 2	Familia 3	
Túnel I	0-20	24	17	14	188
	20-40	16	12	9	
	40-60	14	11	8	
	60-80	15	10	7	
	80-96	13	10	8	
	Todo Túnel	82	60	46	
Túnel II	0-20	18	12	5	131
	20-40	16	8	7	
	0-40	34	20	12	
	40-70	10	5	5	
	70-100	11	6	5	
	100-132	11	7	5	
	Todo Túnel	66	38	27	

Ingresados los datos de entrada, el programa Unwedge, retornaba los valores de FS de las cuñas cinéticamente libres al deslizamiento en las paredes y techo de la sección transversal de los túneles. Se verificó la ocurrencia de cuñas susceptibles al deslizamiento en la pared derecha y techo, se realizaba la anotación de los FS para que, a continuación, se realizara la instalación del sistema de soporte. Con la instalación del sistema de soporte concluido se promovía una nueva anotación de los FS para las cuñas identificadas en el paso anterior, ahora bajo la influencia del sistema de soporte [23].

Los datos anotados se llevaron al programa Excel, donde se procedía a la determinación del FS medio ($E[FS]$), de la desviación estándar del FS ($[FS]$), así como la probabilidad de ruptura existente en cada posición de la sección transversal, que será discutida en el Ítem.-4.6.2. presentan los resultados de los cálculos probabilísticos de los Túneles I en todo el tramo y Túnel II, también en todo el tramo respectivamente. Los resultados por tramos de 20 m y 30 m se de los T-I y T-II. [24].

Cálculo de la probabilidad de ruptura

El cálculo de la probabilidad de ruptura (PR) fue realizado admitiendo que el FS posee su distribución de probabilidad descrita por una distribución log-normal. Así, para la aceptación de la distribución log-normal, una prueba de adecuación de los resultados de los T-I y T-II para la distribución log-normal fue realizada, teniendo como respuesta la distribución de la Figura 2.

Figura 2. Prueba de adecuación de los res

ultados del T-I para con la distribución log-normal

La perfecta adecuación obtenida, ocurre debido a la función de distribución de probabilidad log-normal estar restringida a valores de variables aleatorias mayores que cero. Así, atendiendo perfectamente al requisito del FS no tener valores menores que cero.

El cálculo de la Probabilidad de Ruptura (PR) se realiza por medio del área bajo la curva de distribución de probabilidad de la log-normal contenida a la izquierda del $FS = 1$, como se muestra en la Figura 44 y también descrita en el Capítulo 1 Ítem 1.10. Para la realización del cálculo de la PR, empleó - si la función Dist. Lognormal del programa Excel con el cual, a partir de la media y desviación estándar de los datos en estudio, es posible de manera práctica y fácil, obtener la determinación del valor de la PR contenido en el FS de cuñas. Megard, (1968).

4 CONCLUSIONES

Las caracterizaciones de los macizos rocosos se tornaron importante y de gran significado en el proyecto de excavación de los túneles de Karkatera. Las propiedades y características de las discontinuidades de los macizos, pudieron ser cuantificados y debidamente interpretados, los estereogramas nos permiten visualizar la conformación de concentraciones de discontinuidades del macizo, y nos infiere a determinar las medidas para hallar las cantidades de familia, (variables) para las clasificaciones geomecánicas, estudios estadísticos, mediante el método Determinístico y probabilístico.

5 CONCLUSIONES

Las caracterizaciones de los macizos rocosos se tornaron importante y de gran significado en el proyecto de excavación de los túneles de Karkatera. Las propiedades y características de las discontinuidades de los macizos, pudieron ser

cuantificados y debidamente interpretados, los estereogramas nos permite visualizar la conformación de concentraciones de discontinuidades del macizo, y nos infiere a determinar las medidas para hallar las cantidades de familia, (variables) para las clasificaciones geomecánicas, estudios estadísticos, mediante el método Determinístico y probabilístico, para tomar decisiones correctivas con respecto a la estabilidad del túnel. La clasificación Geomecánica, con la interacción de tres Clasificaciones aceptadas por el ISRM (Q; RMR y RQD), nos permite crear intervalos para luego determinar el tipo de sostenimiento que pide el programa Unwedge y así hallar un nuevo Factor de Seguridad (F.S.) con sostenimiento. Las tablas, ábacos u otros criterios establecidos para determinar la restitución del equilibrio del macizo rocoso (sostenimiento), son referenciales, por lo mismo que una estructura rocosa es compleja y difiere en caracterización de otras; la clasificación de un determinado sostenimiento se basa en las características propias y singulares de la estructura en estudio. Tal como en el T-I el comportamiento es casi regular u homogéneo y en el T-II el comportamiento de las discontinuidades a partir de los 40 m. cambia por la presencia de una falla o un dique de más de 1 m. La aplicación de programas computacionales como el Roclab, Dips y Unwedge, permitió una simplificación de los métodos de caracterización, tipología estructural, clasificación y modelamiento de los macizos rocosos en el lugar de la obra; sobre todo, para la aplicación en los estudios estadísticos y probabilísticos, de ruptura, para la previsión de futuros refuerzos y soportes.

6 REFERENCIAS

- [1] P. Giani, *Rock Slope Stability Analysis*, Rotterdam: CRC Press, 1 Edition 361 p, 1992.
- [2] Dusseault, M. y Franklin, J., *Rock Engineering*, USA: Ed. McGraw-Hill, 1989.
- [3] Barton, Lien, R & Lunde, J, *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Norway: Norwegian Geotechnical Institute Oslo 8, 1974.
- [4] E. Goodman, *Introducción to Rock Mechanics*, New York USA: Jhon Wiley & Sons, 1989, p. 251.
- [5] E. Hoek y C. Carranza-Torres, «El Criterio de rotura de Hoek-Brown», *Ingeo Tuneles*, Madrid España, 2004.
- [6] B. Hidalgo, «Ingeniería de Rocas en el túnel de conducción», *Bol Ciencias de la tierra*, Colombia, 2002.
- [7] V. Terzaghi, «The 23rd U.S Symposium on Rock Mechanics (USRMS)», Berkeley, California USA, 1946.
- [8] N. Barton, D. R. Lien y J. & Lunde, «Estimation of support requirements for underground excavation», In *HUSTRULID*, W, New York USA, 1982.
- [9] T. Bieniawski, «Rock Mass classification as a design aid in tunneling. Tunnels and Tunneling», *Mining and Mineral Resources Institute*, Pennsylvania, USA, 1986.
- [10] Ang, Alfredo, H.S: & Tang, Willson, «Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles», Jhon Wiley & Sons, New York USA, 1975.
- [11] Hammersley, M. & Handscomb, C, «Monte Carlo Methods», Editt Methuem & Co., Ltd, London, 1964.
- [12] Kottegoda, T & ROSSO, Renzo, «Statistics, Probability and Reliability for Civil and Environmental Engineers», Mc Graw-Hill, New York USA, 1997.
- [13] Hahn, J. & Shapiro, S. , «Statistical Models in Engineering», Edit Jhon Wiley & Sons, Nueva Jersey, USA, 1967.
- [14] A. Lionco, «Behaviour of deep shafts in rock considering nonlinear elastic models», University of Brasilia, Departament of Civil and Environmental Engineering 70910, Brasilia, DF Brasil, 1999.
- [15] Carnero, T. y Fujimura, F, «Mecánica de Rochas Aplicada ao Dimensionamiento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterráneas. Dissertação de Mestrado», Sao Paulo, EPUSP, Brasil, 1995.
- [16] A. Lauro, «Análise da Interação Maciço-Suporte em Túneis Escavados em Rocha», Dissertacion de Maestria Universidad de Brasilia, Brasil, 2001.
- [17] C. A.; «Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha», Dpto. de Engenharia Civil e Ambiental Faculta de Tecnologia, Brasil, 2003.
- [18] H. Jaramillo, «Nuevas Técnicas geofísicas Aplicadas en Ingeniería Geotécnica», Colegio de Ingenieros Civiles de México, CDMZ México, 2017.
- [19] J. Romero, «Compromise Solutions in Mining Method Selection - Case Study in Colombian Coal Mining. Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería», Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería Universidad Sergio Arboleda, Bogotá - Colombia, 2012.
- [20] Ramirez, P. y Alejaio, L., «Mecánica de rocas, Fundamentos en Ingeniería de Taludes. Máster Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los recursos Minerales"», Universidad Politécnica de Madrid, España, 2008.
- [21] M. Garrido, «Evaluación del coeficiente de seguridad del sostenimiento de galerías y túneles en función de su rigidez», ETSI Universidad Politécnica de Madrid, España, 2003.
- [22] Ferrer, M. & Gonzàles de Vallejo, L., «Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos», Instituto Geológico de España, Madrid - España, 2007.
- [23] H. Laughlin, «The Geology and Physiography of the Peruvian Cordillera departments of Junín and Lima», *Geological Society of America Bulletin*, Lima Peru, 1924.
- [24] R. Morocco, «Geología de los cuadrángulos de Andahuaylas, Abancay y Cotabambas», Instituto de Geología y Minería, Lima Perú, 1975.