

Stability assessment around a railway tunnel using terrestrial laser scanner data and finite element analysis

Evaluación de la estabilidad alrededor de un túnel ferroviario usando los datos de un escáner láser y el análisis de elementos finitos

S. Villalobos ^{1*}, P. Cacciari ^{**}, M. Futai ^{***}

* Universidad Católica de la Santísima Concepción – Concepción, CHILE

** Vale S.A. – Minas Gerais, BRASIL

*** Universidade de São Paulo – São Paulo, BRASIL

Fecha de Recepción: 09/05/2019

Fecha de Aceptación: 29/11/2019

PAG 21-33

Abstract

Geotechnical analysis of tunnels in complex geo-structural environments requires an advanced understanding of the inter-block structure effect on rock mass behavior, such as joints and fractures systems, bedding and foliation planes, among other discontinuity types. The conventional approach for preliminary geotechnical analysis of tunnels is based on a continuous-equivalent system representation of rock mass, i.e. without explicit consideration of systematic discontinuity systems. However, to obtain a closer to reality results of the rock mass expected behavior, geo-structural data should be included from the initial stage of geotechnical analysis. A case study is used to analyze the implications of the discontinuity systems inclusion on the rock mass stability around tunnel. Two-dimensional finite element numerical models were developed using three different models to the generation of rock discontinuity systems. The obtained results show that fracture intensity parameter help to generated more realistic two-dimensional DFNs.

Keywords: Tunnel; TLS; FEM; DFNs

Resumen

El análisis geotécnico de túneles en ambientes geo-estructurales complejos requiere de una comprensión avanzada del efecto producido por las estructuras interbloque sobre el comportamiento del macizo rocoso, como los sistemas de juntas y fracturas, los planos de estratificación y foliación, entre otros tipos de discontinuidades. El enfoque convencional de un análisis geotécnico preliminar de los túneles se basa en la representación de un sistema continuo-equivalente del macizo rocoso, es decir, no se consideran explícitamente los sistemas de discontinuidades sistemáticas. Sin embargo, para obtener resultados más realistas del comportamiento esperado del macizo rocoso, se deberían incluir los datos geo-estructurales en la etapa inicial del análisis geotécnico. Se usó un estudio de caso para analizar las implicancias de la inclusión de los sistemas de discontinuidades sobre la estabilidad del macizo rocoso alrededor de un túnel. Se desarrollaron modelos numéricos de elementos finitos bidimensionales usando tres modelos diferentes para generar los sistemas de discontinuidades de la roca. Los resultados obtenidos muestran que el parámetro intensidad de la fractura ayuda a generar mallas de fractura discreta (DFN) bidimensionales más realistas.

Palabras clave: Túnel; TLS; FEM; DFNs

1. Introducción

La construcción de mallas de sistemas de discontinuidades geológicamente realistas para usar en la evaluación geomecánica de excavaciones subterráneas ha ganado terreno sobre las técnicas convencionales que consideran al macizo rocoso como material continuo-equivalente y sistemas de clasificación geomecánica basados en datos empíricos. Actualmente, la técnica de las mallas de fractura discreta es la más usada puesto que ofrece la posibilidad de maximizar el uso de los datos geo-estructurales capturados vía mapeo geotécnico manual o técnicas de muestreo remoto, como la fotogrametría y escáner láser (Elmo et al., 2014).

(Cacciari y Futai 2017) presentaron una metodología para simulaciones numéricas tridimensionales de túneles excavados en macizos rocosos discontinuos, basada en la técnica de TLS y generación de DFN. Estos autores discuten diversos aspectos relacionados con el mapeo de las discontinuidades usando el TLS, el análisis estadístico de las discontinuidades mediante métodos de muestreo de ventana y modelación numérica tridimensional con DFN.

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Católica de la Santísima Concepción –
Talcahuano, CHILE
E-mail: svillalobos.ic@gmail.com



La construcción de un proyecto de excavación subterránea con frecuencia se hace en el macizo rocoso con sistemas de discontinuidades tales como fallas, planos de estratificación y foliación, diaclasas y fracturas, entre otras. Estos sistemas de discontinuidades inducen la formación e inestabilidad de los bloques y cuñas rocosas durante las etapas de excavación y operación de las obras subterráneas. Generalmente, estos sistemas de discontinuidades ocurren en conjuntos, que pueden ser descritos geoméricamente por su orientación, longitud de traza, persistencia y espaciamiento. Además, la baja y a veces inexistente resistencia de la sección transversal de los sistemas de discontinuidades, los altos niveles de esfuerzo in situ, así como las condiciones de pérdida de confinamiento durante la ejecución de las excavaciones, inducen diferentes modos de inestabilidad y fallas de los bloques rocosos formados por la intersección de dos o más sistemas de discontinuidades, como el deslizamiento, volcamiento y caídas o colapsos dentro de la excavación.

Para estudiar el efecto de la inclusión de los datos geo-estructurales en la estabilidad de las excavaciones subterráneas construidas en macizos rocosos discontinuos, se usó como estudio de caso un tramo de 10m de largo del túnel Monte Seco, ubicado en el sudeste de Brasil. Para ello, se hicieron simulaciones numéricas bidimensionales considerando un medio elastoplástico semi discontinuo usando el software comercial para el cálculo de los elementos finitos FEM-RS2 (Rocscience, 2015).

En las simulaciones numéricas, que consideran explícitamente los sistemas de macizos rocosos discontinuos, se evaluaron tres metodologías para generar las mallas de discontinuidades, estas son: el modelo paralelo determinístico, paralelo estadístico y empírico de Baecher (Rocscience, 2015); (Baecher et al., 1977). Se importó directamente los parámetros de entrada que, en este caso, corresponden a las mediciones con TLS de los parámetros geoméricos del sistema de discontinuidades. De esta forma, se crearon planos de discontinuidades, definidos por sus características geométricas específicas que, a la vez, generan mallas bidimensionales de sistemas de discontinuidades asociadas al modelo de elementos finitos.

Los resultados obtenidos señalan y destacan el significativo efecto de la modelación explícita de los sistemas de discontinuidades sobre los patrones esfuerzo-desplazamiento alrededor del túnel estudiado, siendo capaz de visualizar cuantitativamente los efectos generados en la concentración y relajación de los esfuerzos, zonas de falla, formación de bloques y trayectorias de desplazamiento. Además, se compararon los perfiles de sobre excavación obtenidos a través de la modelación numérica con las mediciones con TLS, lográndose una similitud con las observaciones realizadas in situ.

2. Metodología

Las simulaciones numéricas de los túneles en roca deben considerar las complejidades relacionadas con la interacción de la geometría tridimensional del túnel y el sistema de discontinuidad geométrica real (es decir, orientación, longitud de traza, persistencia y espaciamiento). Generalmente, los sistemas de discontinuidades se representan determinísticamente sin considerar las incertezas ni la variabilidad espacial que representan las características inherentes a los problemas mecánicos de las rocas (Einstein y Baecher, 1983). Actualmente, las técnicas de muestreo remoto terrestre (por ej., fotogrametría digital y escáner láser) son una herramienta adicional, muy conveniente para reducir estos problemas. Los datos del muestreo remoto entregan información geotécnica como orientación y longitud de las discontinuidades, así como la ubicación de cada medición de la discontinuidad.

El volumen de datos puede ser significativamente mayor tanto en términos de la magnitud como de la extensión del área mapeada comparado con el mapeo de datos geotécnicos tradicionales (Fekete y Diederichs, 2013). Los datos capturados de las discontinuidades se pueden usar para desarrollar DFN escolásticas a fin de obtener una representación más realista del sistema de discontinuidades (Havaej et al., 2016). La aplicación de los métodos de muestreo remoto para el mapeo de las discontinuidades ha aumentado significativamente en la última década. Existen diversas aplicaciones de las técnicas de muestreo remoto en la práctica de la ingeniería de rocas, tales como la caracterización de la masa rocosa (Tonon y Kottenstette, 2006); (Ferrero et al., 2009); (Lato et al., 2009), (Lato et al., 2010); (Gigli and Casagli, 2011); (Lato et al., 2013); (Otoo et al., 2013); (Deliormanli et al., 2014); (Lai et al., 2014), rock slope stability (Strouth et al., 2006); (Ghirotti and Genevois, 2007); (Sturzenegger y Stead, 2009); (Lato y Vöge, 2011); (Lato et al., 2012); (Lato et al., 2015); (Tuckey and Stead, 2016) y excavaciones subterráneas (Fekete et al., 2010); (Styles et al., 2010); (Fekete and Diederichs, 2013); (Lato y Diederichs, 2014); (Preston et al., 2014); (Walton et al., 2014); (Cacciari and Futai, 2017); (Delaloye et al., 2015); (Villalobos et al., 2017).

Las DFN se han usado para una amplia gama de problemas geo-mecánicos (por ej., pozos abiertos, tunelización, espeleología en bloque, geomecánica del yacimiento, etc.). Para definir una malla de fractura que represente a un sistema de discontinuidades natural, (Elmo, 2006) menciona que se requiere de al menos tres conjuntos de parámetros: distribución de los tamaños de fractura, distribución de la orientación de las fracturas y



densidad de las fracturas. (Dershowitz et al., 2014) definen dos parámetros: la intensidad aérea P_{21} e intensidad volumétrica P_{32} , para representar el grado de fractura de la masa rocosa. P_{21} y P_{32} se definen como la longitud acumulativa de fracturas por área unitaria y área acumulada de fracturas por volumen unitario, respectivamente (Havaej et al., 2016).

En este estudio, usamos el método de elementos finitos bidimensional para investigar la estabilidad de la masa rocosa alrededor del túnel Monte Seco, ubicado en Minas Gerais, Brasil. La (Figura 1) ilustra la metodología adoptada. Se realizó un TLS en el lugar para caracterizar la masa rocosa. Se usó la nube de punto derivada del TLS para reproducir una geometría realista de la masa rocosa para un tramo de 10m de largo representativo del túnel, que luego se incorporó a las simulaciones numéricas usando los elementos finitos. También se realizó un mapeo de las discontinuidades usando los datos del TLS, que permitió el desarrollo de DFN realistas. Los datos del TLS se usaron además para reproducir los perfiles de sobre excavación de los tramos del túnel, los que luego se compararon con los resultados de la simulación numérica bidimensional.

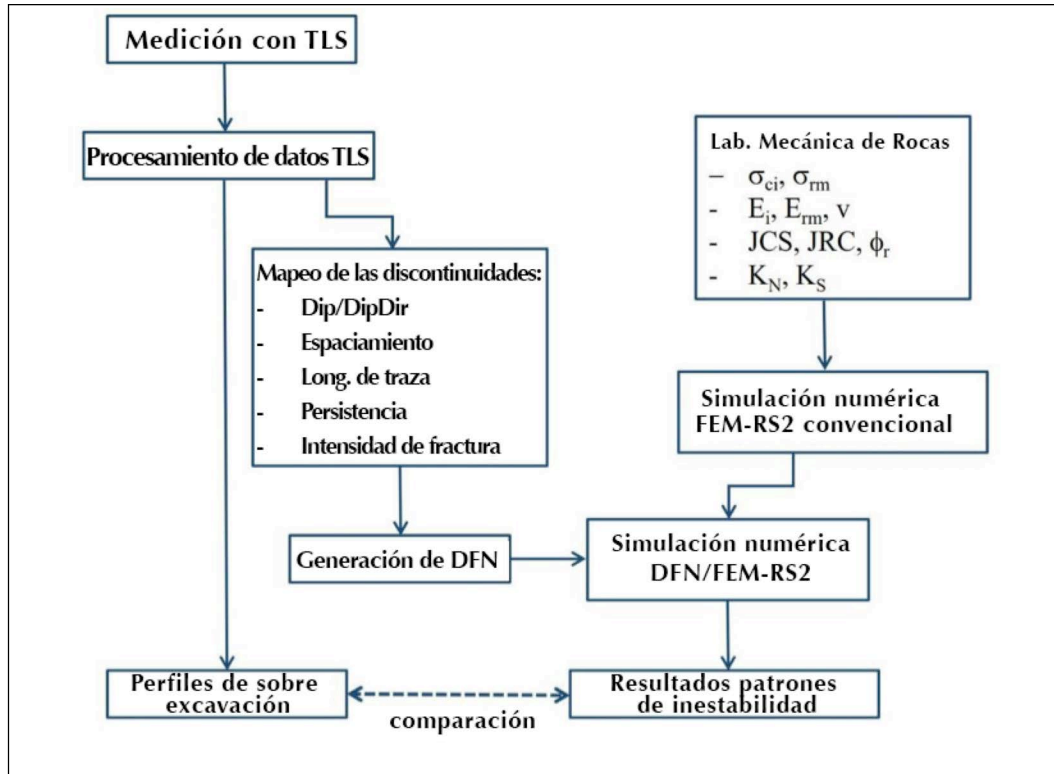


Figura 1. Metodología adoptada para caracterizar el macizo rocoso y simulaciones numéricas posteriores

3. Estudio de caso: túnel monte seco

En Brasil, existen muchos túneles antiguos dentro del sistema de carreteras y ferrocarriles que datan de la década de 1950. Fueron construidos en el macizo rocoso, son de una calidad geotécnica muy buena, pero no cuentan con ningún sistema de refuerzo o de apoyo. Actualmente, algunos de esos túneles han mostrado problemas localizados por formación y caída de bloques rocosos, principalmente asociados a la distribución de los sistemas de discontinuidades y procesos de degradación puntual de los parámetros geo-mecánicos asociados.

El túnel Monte Seco es una antigua obra subterránea lineal, construido para el ferrocarril Vitória-Minas en el Estado de Espírito Santo al sudeste de Brasil (Figura 2), perteneciente a la compañía minera VALE S.A. Este túnel ha requerido de una serie de investigaciones geológicas y geotécnicas para entregar sus parámetros geo-mecánicos y evaluar su estabilidad.

Considerando lo anterior, se inició un proyecto conjunto entre la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo y la Compañía Minera VALE S.A. para proponer una metodología de estudio del estado actual del túnel. En consecuencia, el túnel Monte Seco se ha transformado en una valiosa fuente de información geomecánica para estudiar la estabilidad de la obra subterránea construida en ese macizo rocoso. A continuación, se presentan las características y propiedad T_0 des consideradas en este trabajo.

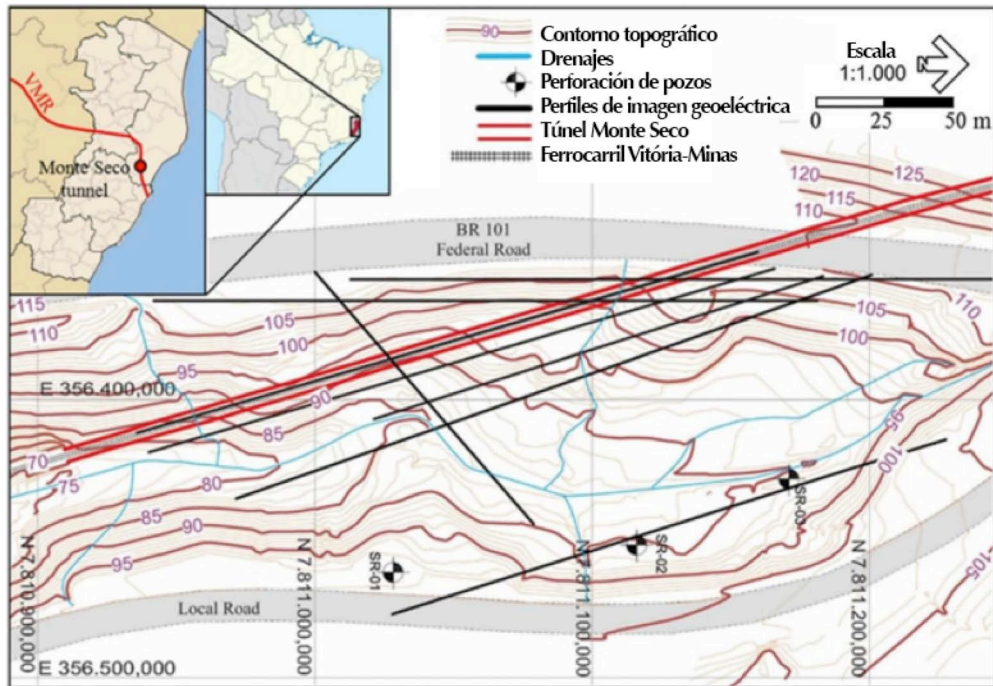


Figura 2. Ubicación del túnel Monte Seco e investigaciones técnicas realizadas in situ (Cacciari y Futai, 2017)

3.1 Recopilación de datos geo-estructurales

El túnel Monte Seco se ubica en la Provincia de Mantiqueira, se construyó en un macizo rocoso formado por un Gneis (metamorfismo de rocas sedimentarias), con textura milonítica, compuesto por bandas feldespáticas (con predominio de cuarzo y feldespato) y máficas (con predominio de violita y anfibolita), con foliación pronunciada, debido principalmente a la orientación de la mica. Además, en diversos tramos al interior del túnel, así como en el afloramiento de las rocas externas, se ven bolsillos de Granito inserto en el Gneis, con diámetros de entre 1,0 y 3,0m, con contacto abrupto, sin foliación y con una textura pegmatítica.

(Cacciari y Futai, 2017) caracterizaron geotécnicamente los sistemas de discontinuidades usando el muestreo remoto, conocido como TLS, para generar la nube de puntos de la (Figura 3a). La metodología usada se puede resumir en los siguientes tres pasos: (i) mapeo completo de las discontinuidades en la nube de puntos con TLS, midiendo todas las posiciones, longitudes y orientaciones de las trazas de cada conjunto de discontinuidades; (ii) análisis de las discontinuidades para determinar las funciones de densidad de probabilidad de los diámetros y orientaciones de cada conjunto de discontinuidades y (iii) cálculo de los parámetros de intensidad volumétrica, P_{32} y P_{21} , para cada conjunto de discontinuidades.

El mapeo de los sistemas de discontinuidades en la nube de puntos TLS consiste en la interpretación de las discontinuidades presentes en la superficie rocosa del túnel (por ej., paredes y techo) y realizar las respectivas mediciones. La orientación se mide a través de la selección de puntos co-planares a las áreas expuestas de las discontinuidades y extrayendo el vector normal al plano ajustado para esos puntos. Luego, los vectores normales medidos son convertidos a la notación geo-estructural (es decir, Dip y DipDir). Las trazas son la intersección entre las discontinuidades y la superficie rocosa expuesta dentro del túnel. Por último, las longitudes de trazas se miden tomando la distancia entre los puntos finales de las polilíneas ajustadas en esas trazas. Las (Figura 3b) y (Figura 3c) presentan ejemplos de las mediciones de la longitud y orientación de las trazas en la nube de puntos.

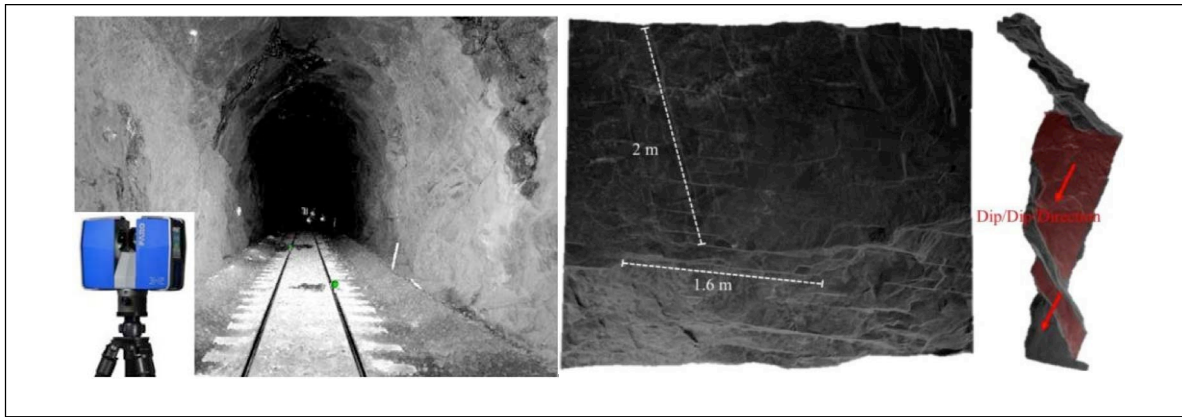


Figura 3. a) Escáner Láser modelo Faro Focus 3D y un ejemplo de la imagen TLS del túnel Monte Seco (nube de puntos) generada por este instrumento. b) Medición de las longitudes de traza y c) Medición de la orientación

3.2 Análisis de datos geo estructurales

El túnel Monte Seco está construido en un macizo rocoso de Gneis, donde se identificaron y caracterizaron cuatro sistemas de discontinuidades durante la inspección in situ: dos sistemas de fractura a lo largo de los cortes F1 y F2, un sistema de diaclasamiento laminar F3 y un sistema de foliación Sn. Se mapearon detalladamente estos sistemas de discontinuidades por imágenes TLS. La (Figura 4a) muestra las mediciones de la orientación por imágenes TLS, identificando cada uno de estos sistemas de discontinuidades y la dirección del túnel. La (Figura 4b) muestra la formación e inestabilidad de los bloques que tienden a deslizarse y caer dentro de la excavación del túnel.

En la mayoría de los casos encontrados en la literatura técnica, las longitudes de trazas se describen usando distribuciones log-normal, gamma o exponenciales distributions (McMahon, 1974); (Call et al., 1976); (Baecher et al., 1977); (Priest y Hudson, 1981); (Kulatilake y Wu, 1984); (Villaescusa y Brown, 1992); (Zhang y Einstein, 2000). Se analizaron todas las longitudes de trazas de los sistemas F1, F2 y F3 mapeadas en las imágenes TLS del túnel mediante ensayos estadísticos para encontrar la forma de distribución que se ajustara mejor. En la Figura 5 se aprecia la distribución que mejor se ajusta a cada sistema de discontinuidad, que en todos los casos resultó ser la distribución log-normal. El sistema de foliación se consideró como persistente en la escala del túnel, sin embargo, sus trazas no se analizaron estadísticamente. Para el tramo evaluado de 10m del túnel no se encontró el sistema F3. La (Tabla 1) resume los datos geo-estructurales considerados para las simulaciones numéricas.

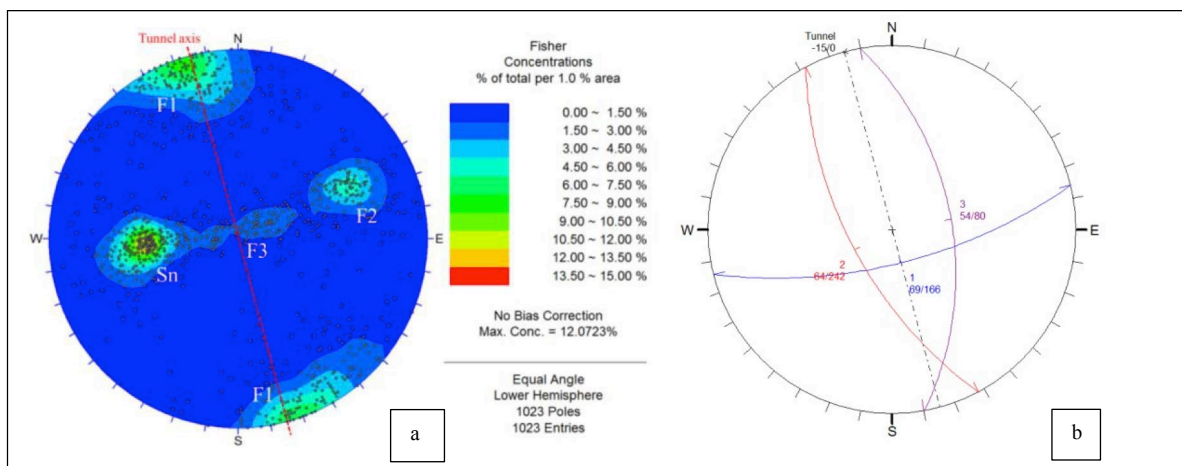


Figura 4. Red estereográfica de la orientación de las discontinuidades medida con imágenes TLS: a) Concentración de polos y b) Planos representativos sin sistema F3

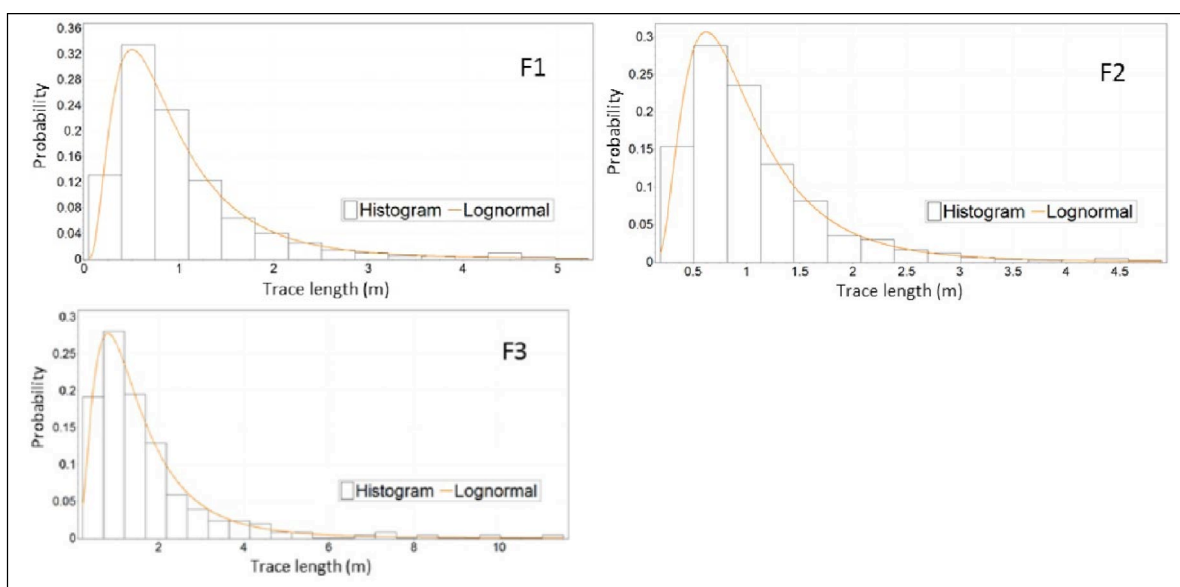


Figura 5. Distribuciones Log normal ajustadas a F1. F2 v datos de longitud de traza F3

3.3 Roca intacta y parámetros de discontinuidad

Siguiendo las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Bieniawski y Bernede, 1979); (Ulusay, 2015), se hicieron ensayos a compresión uniaxial considerando tres orientaciones diferentes para el sistema de foliación. Además, se realizó la medición de las deformaciones axial y radial con medidores de deformación instalados en las probetas de ensayo, lo que permitió obtener la resistencia a la compresión uniaxial y los parámetros de elasticidad, es decir, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de la roca intacta (Ito, 2016); parámetros que se usaron en las simulaciones numéricas.

La (Tabla 2) presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos a compresión uniaxial, donde se observa una reducción sustancial de la resistencia, cercana al 50%, principalmente en las probetas de ensayo que presentaban minerales alterados y grietas.

Además, se realizaron diferentes ensayos, por ejemplo, a tracción directa e indirecta y ensayos de inclinación y esclerometría para determinar los parámetros geo-mecánicos de los sistemas de discontinuidades (Barrios, 2014); (Ito, 2016); (Monticelli, 2014). Para los tres sistemas de discontinuidades (F1, F2 y Sn), se consideró el criterio de falla de Barton-Bandis (Bandis et al., 1981); (Barton et al., 1985). La (Tabla 3) presenta un resumen de los parámetros de resistencia al corte correspondiente a cada sistema de discontinuidad.

Se estimó la rigidez normal y al corte de los sistemas de discontinuidades del módulo de masa rocosa, del módulo de roca intacta y espaciamiento de las grietas. Se asumió que la deformabilidad de una masa rocosa se debe a la deformabilidad de la roca intacta y a la deformabilidad de las discontinuidades en la masa rocosa, con $K_N = 3,5$ GPa/m para F1 y F2, y $K_N = 2,8$ GPa/m para Sn. En este estudio, se estimó la rigidez al corte de las discontinuidades usando la razón $K_N/K_S = 10$.

Un aspecto muy importante y de gran influencia dentro de este trabajo es la degradación que han experimentado los diferentes planos de discontinuidades a través del tiempo. (Monticelli, 2014) caracterizó los procesos de alteración del macizo rocoso del túnel Monte Seco, concluyendo que el tipo de intemperización es de tipo químico de intensidad moderada a fuerte, presentando un fuerte control estructural relacionado con la presencia de fracturas y foliación. La foliación intensifica el proceso de alteración de la matriz rocosa de los bloques formados alrededor del túnel, facilitando la percolación del agua a través de las fisuras inter y trans minerales formadas en los planos alterados. Tanto en la matriz rocosa como en los planos de discontinuidad, los distintos grados de alteración presentan características micro morfológicas (fisuras y poros) relacionadas con el proceso de expansión-contracción de la mineralogía secundaria conformada por agregados de Pirita, Clorita y Esmectita, siendo esta última confirmada por ensayos de difracción de rayos X, donde también se apreció que los planos de fractura tienen procesos de alteración controlados por las fisuras inter-minerales conectadas a lo largo de la foliación y que estas fisuras trans-minerales son bastante expresivas y paralelas a los planos de fractura, ocurriendo con o sin relleno de óxidos de clorito de hierro.



Tabla 1. Datos geo-estructurales usados para la generación de DFN bidimensionales

Sistema de Discontinuidad	F1	F2	Sn
Dip (°)	69	64	54
DipDir (°)	166	242	80
K (Fisher)	32,8	251,3	78,9
Desv. Estándar (°)	15,2	5,5	9,8
Espaciamiento (m)	0,48	0,32	0,5
Long. de traza (m)	3,67	3,91	Infinito
Persistencia	0,5	0,75	-
P ₂₁ (m/m ²)	0,48	2,51	-

Tabla 2. Parámetros elásticos y resistencia de la roca intacta

Parametro	Σ (MPa)	E _i (GPa)	ν (-)
Rango	121 – 159	51 – 67	0,18 – 0,35
Media	139	65	0,25
Desv. Estandar	19	14,5	0,11

Tabla 3. Parámetros de resistencia de juntas de Barton y Bandis

Parámetro	JCS (MPa)		JRC (-)		ϕ (°)	
	F1 - F2	Sn	F1 - F2	Sn	F1 - F2	Sn
Rango	80 – 140	120 – 140	9 – 13	8 – 10,5	23 – 29	24 – 30
Media	110,4	126,3	10,5	8,8	25,6	27,9
Desv. Estándar	30,6	11,6	2,1	1,4	3,1	3,5

4. Modulaci3n numérica FEM

Basándose en la informaci3n geol3gica y de mecánica de rocas descritas anteriormente, se desarrollaron modelos numéricos elasto-plásticos semi-discontinuos plano-esfuerzo usando un software comercial.

4.1 Esfuerzos y condiciones de borde

El objetivo principal de este trabajo era observar el comportamiento del macizo rocoso alrededor de la excavación del túnel, los bordes del modelo de elementos finitos han sido restringidos en dirección horizontal y vertical. Para el análisis se usó una malla de elementos finitos triangular con 3 nodos, considerando una mayor densidad de elementos finitos cerca de la excavación (Figura 6a). La geometría del túnel está definida con forma de herradura con 6,5 m de alto por 6,0 m de ancho (Figura 6b). El estado de esfuerzo vertical in situ fue estimado considerando la columna litológica sobre el techo del túnel, y con una razón de esfuerzos horizontal/vertical de $K_0 = 1.35$. El túnel poco profundo se encuentra ubicado a una profundidad de entre 35 y 45m. Se aplicó un esfuerzo vertical de 1,0 MPa al modelo para simular la carga gravitacional de los estratos de masa rocosa sobrecargados, basándose en una profundidad de sobrecarga promedio de 40m y con una densidad de material de sobre carga de 25 kN/m^3 .

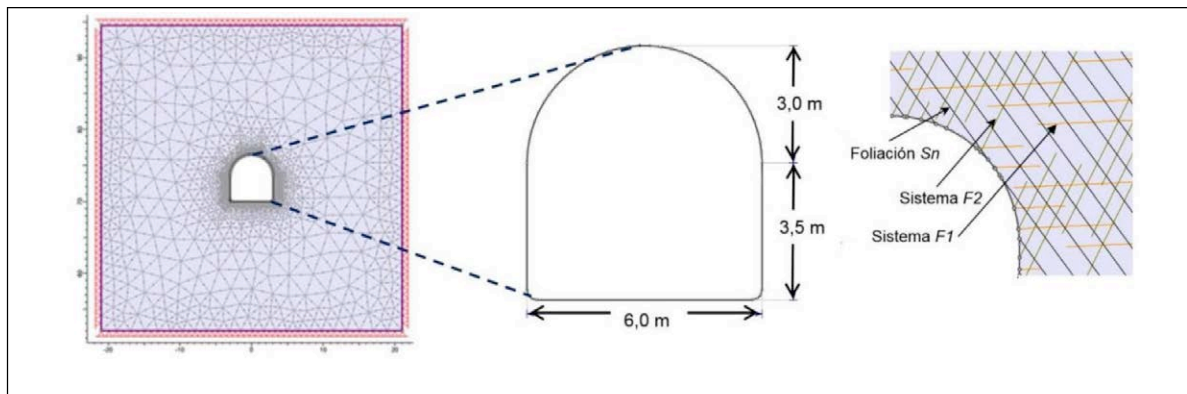


Figura 6. a) Geometría y condiciones de borde del modelo de elementos finitos, b) Dimensiones de la sección tipo herradura del túnel y c) Generación del sistema de juntas aleatorias de rocas (Villalobos et al., 2017)

4.2 Modelo del macizo rocoso

Para el modelo del macizo rocoso se consideró el criterio de Hoek y Brown (Hoek et al., 2002), adaptado de acuerdo a la metodología descrita por (Diederichs, 2007), donde los parámetros de resistencia máxima y residual se seleccionan de modo que ocurra un comportamiento de ablandamiento por tensión (strain-softening) en el perímetro cercano a la excavación, mientras aumenta el confinamiento (es decir, ocurre un endurecimiento por tensión lejos del perímetro de la excavación). Se estimaron tres sistemas de discontinuidades claramente definidos (fractura de planos: F1, F2; y plano de foliación: Sn) considerando el criterio de falla de Barton y Bandis (Bandis et al., 1981); (Barton et al., 1985).

4.3 Generación de los sistemas de discontinuidad rocosa

La modelación numérica consideró los datos geo-estructurales para evaluar la formación y estabilidad de los bloques de roca alrededor de la excavación del túnel. El macizo rocoso fue modelado como un material de tipo elasto-plástico interceptado por sistemas de discontinuidades geológicas; en este caso, la malla del sistema de discontinuidades rocosas se presenta en la (Tabla 1). Considerando las propiedades mecánicas de la roca intacta y las discontinuidades, se podría prever que las fallas principalmente son controladas por los sistemas de discontinuidades en el modelo numérico semi-discontinuo. Se ha considerado como material de roca intacta, con buenas propiedades mecánicas, como resultado, las discontinuidades, en general, tienen propiedades mecánicas mucho más bajas que los bloques rocosos intactos. En consecuencia, el modelo numérico semi-discontinuo es una valiosa herramienta de análisis porque permite el deslizamiento de bloques inestables a lo largo de los sistemas de discontinuidad. Para el modelo numérico semi-discontinuo, que considera explícitamente los sistemas de discontinuidad del macizo rocoso, se evaluaron tres metodologías para la generación de mallas discontinuas. Estos son:

4.3.1 Modelo determinístico paralelo

Se desarrolló el modelo determinístico paralelo para las discontinuidades rocosas que definen una malla de discontinuidades paralelas, con espaciamiento y orientación fijos. En este caso, el término determinístico se refiere al hecho de que el espaciamiento, longitud y persistencia de las juntas se asume como constante (es decir, sin variación estadística). Sin embargo, el modelo determinístico paralelo permite la aleatoriedad de la ubicación de la junta. La orientación definida por el plano de traza en la malla de discontinuidades es simplemente el plano



transversal del modelo. El espaciamiento es la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidades paralelas. Para el modelo determinístico paralelo, el espaciamiento es un valor constante.

4.3.2 Modelo estadístico paralelo

El modelo estadístico paralelo permite definir una malla de discontinuidades paralelas con distribuciones estadísticas definidas, en este caso, log normal, para el espaciamiento, longitud y persistencia de las discontinuidades. Los parámetros de orientación para el modelo estadístico paralelo de la malla de discontinuidades tienen la misma definición que para el modelo determinístico paralelo. El espaciamiento, la longitud de traza y la persistencia se pueden definir como una variable aleatoria seleccionando una distribución estadística e ingresando la desviación estándar y media, así como los valores máximos y mínimos. En el modelo estadístico paralelo, si se definen la longitud de traza y la persistencia como valores aleatorios, entonces la longitud de cada segmento de discontinuidades y la brecha de material intacto entre los segmentos de discontinuidades adyacentes, serán variables de acuerdo a las distribuciones estadísticas definidas.

4.3.3 Modelo de Baecher

La característica principal del modelo de Baecher es la suposición de una forma circular discontinua. Para generar la malla de discontinuidad discreta se requieren los siguientes parámetros: densidad de las discontinuidades (número de discontinuidades por área unitaria), la distribución de la orientación, el tamaño y forma de esas discontinuidades. Los centros de discontinuidad se ubican de manera uniforme en el espacio, usando el proceso de Poisson y las discontinuidades se generan como discos con un radio y orientación dados. Como resultado de la ubicación de la fractura, forma y tamaño del modelo, las discontinuidades terminan en la roca intacta y se interceptan entre sí. Es posible asumir cualquier combinación de tamaño, ubicación y orientación de las discontinuidades (Grenon et al., 2017).

5. Resultados y evaluación

Se generó una malla explícita de sistemas de discontinuidades rocosas dentro de un área limitada para reducir el tiempo de cálculo manteniendo una alta precisión en la proximidad inmediata a la excavación del túnel. Se usó la generación de sistemas de discontinuidades rocosas para encontrar representaciones más realistas de los patrones de las juntas, basados en los datos geo-estructurales.

Más adelante se presentan los resultados del análisis bidimensional, considerando explícitamente los datos geo-estructurales. Cabe señalar que este análisis de sensibilidad tiene el objetivo de evaluar, de manera sencilla, la estabilidad del macizo rocoso alrededor del túnel. A partir de estos datos, es posible verificar los patrones de falla definidos por la intersección de dos o más sistemas de discontinuidades, y la influencia de los datos geo-estructurales en el modelo numérico.

5.1 Patrones de falla y desplazamientos

En la (Figura 7), se muestran la variación de los contornos de desplazamiento y la extensión de la zona de falla en el perímetro del túnel para los tres métodos usados en la generación de mallas de discontinuidades bidimensionales. En este estudio, el foco de análisis considera el corte de los sistemas de discontinuidades, que inducen la formación e inestabilidad de los bloques rocosos en el contorno de la excavación.

La zona perturbada alrededor del túnel es la región donde el estado original de los esfuerzos in situ del macizo rocoso ha sido afectado debido a la ejecución de la excavación. Esta es la zona donde normalmente los bloques de roca tienen desplazamientos importantes y los esfuerzos tangenciales muestran un mayor aumento. De esta forma, los desplazamientos y esfuerzos son los factores que controlan la estabilidad del túnel. En el caso estudiado, el campo de esfuerzos in situ induce la concentración de esfuerzos similares principalmente en las paredes del túnel.

Los resultados obtenidos con los métodos paralelo determinístico y paralelo estadístico (Figura 7a) y (Figura 7c) presentan desplazamientos totales de entre 3 y 5mm, entregando una buena representación de los patrones de desplazamiento y falla experimentados localmente en la pared Oeste del túnel, es decir, tamaños de roca de casi 1,35m. Sin embargo, no había un buen ajuste en la pared Este. Los resultados del modelo de Baecher (Figura 7e) y (Figura 7f) presentaban un desplazamiento máximo del área del túnel de entre 3 y 4mm, indicando mayores zonas de falla con longitudes promedio cercanas a los 0,75m, en ambas paredes del túnel. Este modelo entrega resultados cercanos a lo observado y medido in situ, puesto que asume distribuciones espaciales más realistas de los planos de discontinuidades, usando el proceso de Poisson. Cabe establecer que la formación de bloques inestables en el



contorno del túnel es muy sensible a los parámetros geométricos de las discontinuidades (orientación, espaciamiento y persistencia), así como los parámetros de resistencia al corte y sus rigideces.

5.2 Mediciones de sobrecarga

Los resultados obtenidos con el modelo de Baecher, con una longitud de la zona de fluencia de entre 0,5 y 1,0m, son similares a lo observado en terreno. Para este escenario, se observan deslizamientos de bloques con ápices máximos de 1,0 m en la pared Este, pared derecha en las (Figura 7) y (Figura 8), lo que se asemeja de muy buena forma a las mediciones de sobre excavación realizadas dentro del túnel usando el TLS. Estos resultados son similares a lo observado en los perfiles de sobre excavación del túnel, medidos con TLS. Las mediciones de sobre excavación realizadas demuestran que el tipo común de falla que ocurre dentro del túnel es la caída de bloques con ápices inferiores a 1,5 m en la pared Este. También se observaron mecanismos de falla localizadas en la pared Oeste, con ápices entre 0,85 y 1,25 m.

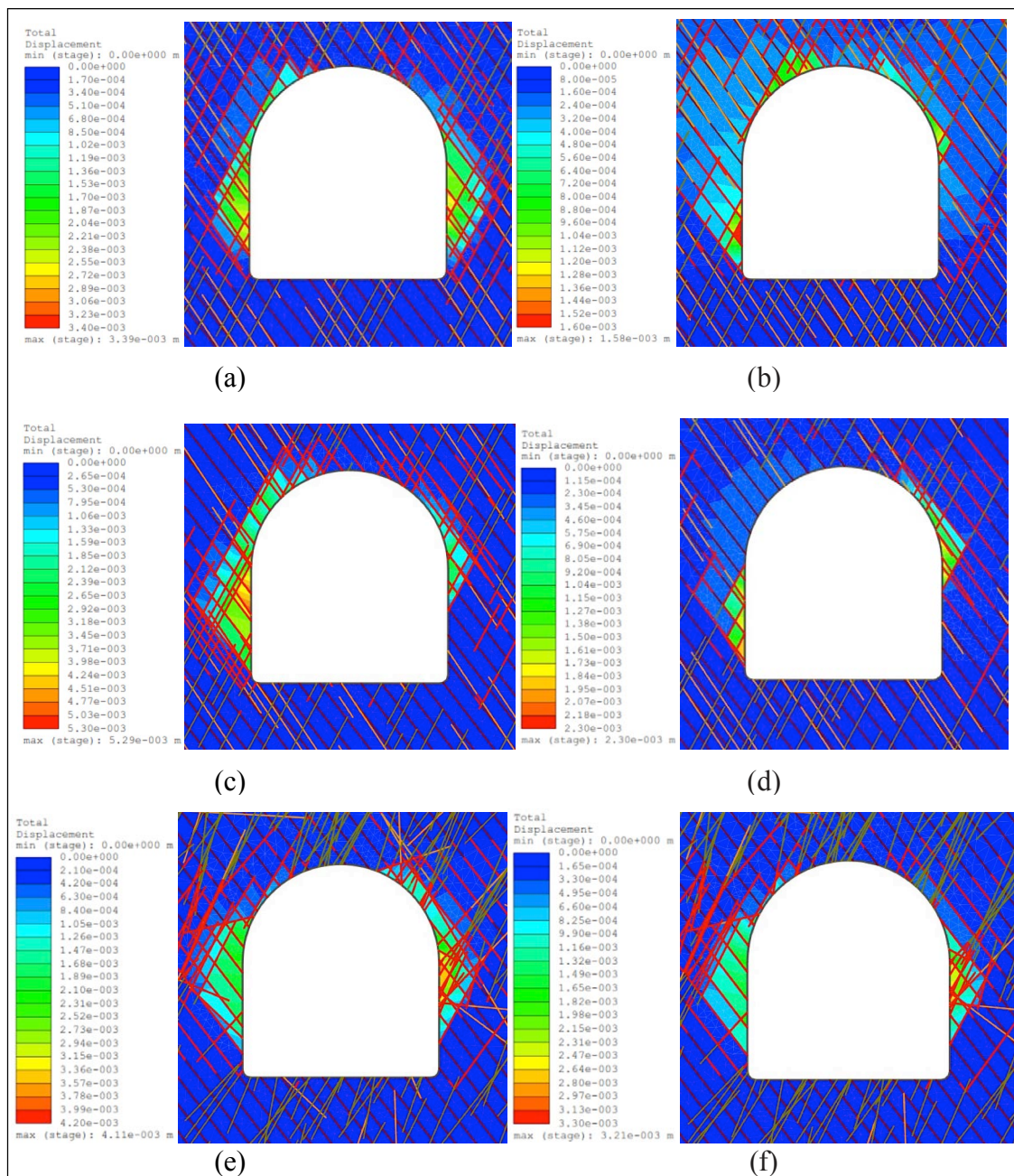


Figura 7. Contornos de desplazamiento y zona de fluencia para diferentes métodos de generación de discontinuidades rocosas: (a) y (b) Determinístico paralelo, (c) y (d) Estadístico paralelo, (e) y (f) Modelo de Baecher

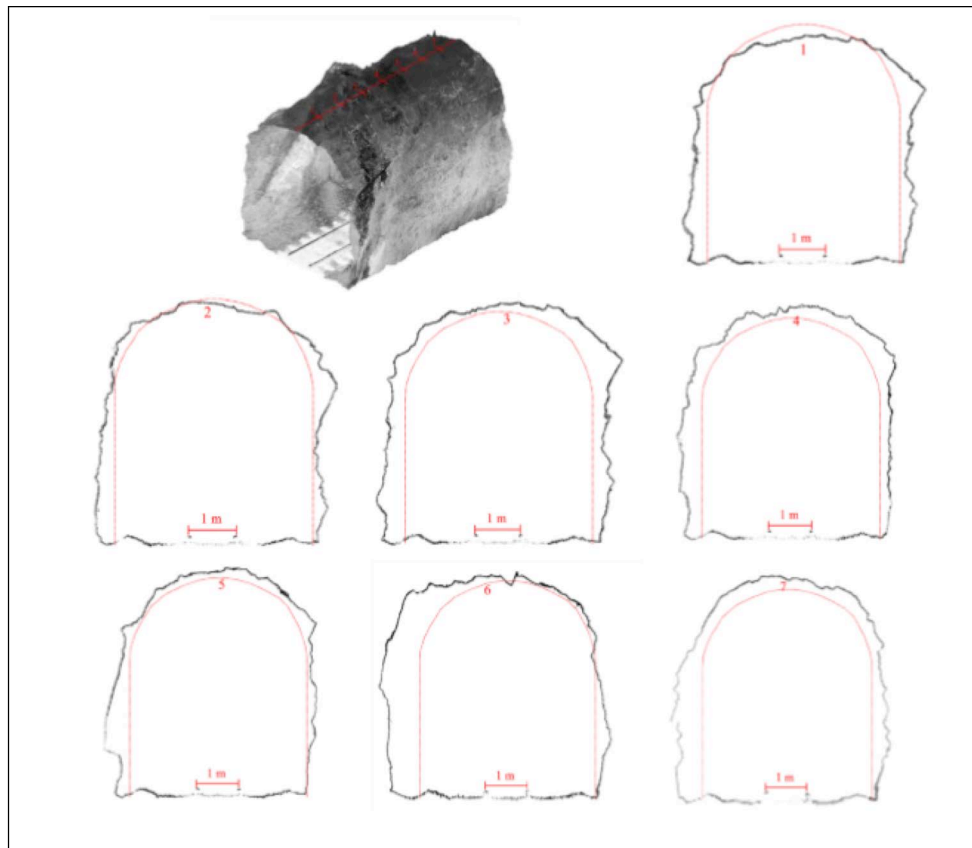


Figura 8. Perfiles de sobre excavación medidos con datos TLS

6. Conclusiones

En este estudio, se usó la caracterización estadística de los sistemas de discontinuidades de los macizos rocosos y un software comercial para el análisis de elementos finitos bidimensional para demostrar y destacar la importancia de modelar explícitamente los sistemas de discontinuidades de los bloques rocosos de los desplazamientos y patrones de estabilidad alrededor del túnel excavado en masas rocosas discontinuas. Con la metodología propuesta, usando datos capturados por TLS y la simulación numérica con elementos finitos, se podría evaluar de manera simple y rápida la formación e inestabilidad de los bloques rocosos alrededor de un túnel excavado en una masa rocosa discontinua.

Debido a la existencia de sistemas de discontinuidades rocosas, se forma una zona plástica alrededor de la excavación. También aparecen zonas plásticas de discontinuidad alejadas del túnel, pero éstas ejercen poca influencia en la estabilidad de la excavación. Los resultados de estos modelos numéricos semidiscontinuos muestran un comportamiento anisotrópico en los patrones de desplazamiento.

La técnica de Escáner Láser Terrestre es una poderosa y práctica herramienta para mapear las discontinuidades en los túneles porque soluciona las dificultades asociadas al mapeo geológico manual tradicional.

Los resultados de los modelos paralelo determinístico y paralelo estadístico no se ajustan bien a los perfiles de sobre excavación del contorno del túnel medido vía TLS. Esto se debe a que, usando estos modelos, la generación bidimensional de los sistemas de DFN no considera el parámetro intensidad de la fractura.

Los resultados del modelo de Baecher, donde se obtuvieron zonas de corte para los sistemas de discontinuidades y el macizo rocoso de entre 0,75 y 1,50m alrededor del túnel, mostraron un buen ajuste con los perfiles de sobre excavación del contorno del túnel, medidos con TLS. Lo anterior porque este modelo considera el parámetro intensidad de fractura para el área P_{2D} , que se deriva del parámetro intensidad de fractura por volumen P_{3D} . En consecuencia, hace que los sistemas generados a partir de las DFN bidimensionales sean más realistas.

7. Referencias

- Baecher, G., Lanney, N., Einstein, H. (1977).** Statistical description of rock properties sampling. 18th American Rock Mechanics Symposium, ARMA. U.S.
- Bandis, S., Lumsden, A., Barton, N., (1981).** Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 1-21.
- Barton, N., Bandis, S., Bakhter, K. (1985).** Strength, deformation and conductivity of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*; 22: 121–140.
- Barrios, B. (2014).** Caracterização da rugosidade. Relatório de Iniciação Científica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 33p.
- Bieniawski, Z., Bernede, M. (1979).** ISRM Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 16: 135–140.
- Cacciari, P., Futai, M. (2017).** Modeling a shallow rock tunnel using terrestrial laser scanning and discrete fracture networks. *Rock Mechanics & Rock Engineering*; 50 (5): 1217–1242.
- Call, R.B., Savely, J., Nicholas, D., Holt, P. (1976).** Estimation of joint set characteristics from surface mapping data. 17th American Rock Mechanics Symposium, ARMA. U.S.
- Delaloye, D., Walton, G., Diederichs, M., Hutchinson, J. (2015).** Sensitivity testing of the newly developed elliptical fitting method for the measurement of convergence in tunnels and shafts. *Rock Mechanics & Rock Engineering*; 48: 651–667.
- Deliormanli, A., Maerz, N.H., Otoo, J. (2014).** Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*; 66: 41–48.
- Dershowitz, W.S., Herda, H. (1992).** Interpretation of fracture spacing and intensity. 42nd US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association, Santa Fe, New Mexico.
- Dershowitz, W.S., Lee, G., Geier, J., LaPointe, P. (2014).** FracMan: interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation. Golder Associates Inc, USA.
- Diederichs, M. (2007).** The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*; 44 (9): 1082–1116.
- Einstein, H., Baecher, G. (1983).** Probabilistic and statistical methods in engineering geology specific methods and examples. Part I: Exploration. *Rock Mechanics & Rock Engineering*; 16: 39–72.
- Elmo, D. (2006).** Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping and fracture mechanics modelling, with particular emphasis on modelling of jointed pillars. University of Exeter, Exeter.
- Elmo, D., Liu, Y., Rogers, S. (2014).** Principles of discrete fracture network modelling for geotechnical applications. First International DFNE Conference, Vancouver, Canada. 204, Paper 238.
- Fekete, S., Diederichs, M., Lato, M. (2010).** Geotechnical and operational applications for 3- dimensional laser scanning in drill and blast tunnels. *Tunneling & Underground Space Technology*; 25: 614–628.
- Fekete, S., Diederichs, M. (2013).** Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 57:11–23.
- Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H. (2009).** Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. *Rock Mechanic & Rock Engineering*, 42:631– 665.
- Ghirotti, M., Genevois, R. (2007).** A complex rock slope failure investigated by means of numerical modelling based on laser scanner technique. 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, 917–924.
- Gigli, G., Casagli, N. (2011).** Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48:187–198.
- Grenon, M., Landry, A., Hadjigeorgiou, J., Lajoie, P.L. (2017).** Discrete fracture network based drift stability at the Éléonore mine. *Mining Technology*, 16(1): 22–33.
- Havaej, M., Coggan, J., Stead, D., Elmo, D. (2016).** A combined remote sensing–numerical modelling approach to the stability analysis of Delabole Slate Quarry, Cornwall, UK. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 49: 1227–1245.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002).** Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMSTAC Conference, Toronto, 1, p. 267-273.
- Ito, W. (2016).** Contribuição ao estudo de instabilidade em tuneis não revestidos da estrada de ferro Vitória-Minas através da teoria dos blocos-chave e caracterização da rocha através de ensaios de laboratório e campo. Dissertação de Mestre em Engenharia (Geotécnica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 176p.
- Kulatilake, P., Wu, T. (1984).** Estimation of mean trace length of discontinuities. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 17: 215–232.
- Lai, P., Samson, C., Bose P. (2014).** Visual enhancement of 3D images of rock faces for fracture mapping. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 72: 325–335.
- Lato, M., Diederichs, M., Hutchinson, D.J., Harrap, R. (2009).** Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46: 194–199.
- Lato, M., Diederichs, M., Hutchinson, D.J. (2010).** Bias correction for view-limited LiDAR scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mechanics & Rock Engineering* 2010, 43: 615–628.
- Lato, M., Vöge, M. (2011).** Automated mapping of rock discontinuities in 3D LiDAR and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 54: 150–158.
- Lato, M., Diederichs, M., Hutchinson, D.J., Harrap, R. (2012).** Evaluating roadside rock masses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols. *Natural Hazards*, 60: 831–864.
- Lato, M., Kemeny, J., Harrap, R., Bevan, G. (2013).** Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rock mass characteristics using LiDAR and photogrammetry. *Computers & Geosciences*, 50: 106–114.
- Lato, M., Diederichs, M. (2014).** Mapping shotcrete thickness using LiDAR and photogrammetry data: Correcting for over-calculation due to rock mass convergence. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 41: 234–240.
- Lato, M., Hutchinson, J., Gauthier, D., Edwards, T., Ondercin, M. (2015).** Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 52: 129–140.
- McMahon, B. (1974).** Design of rock slopes against sliding on preexisting surface. 3rd International Symposium on Rock Mechanics.
- Monticelli, J. (2014).** Contribuição ao conhecimento dos condicionantes geológicos – geotécnicos do túnel Monte Seco. Relatório de Iniciação Científica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 65p.
- Otoo, J.N., Li, X., Maerz, N.H., Duan, Y. (2013).** Verification of a 3-D LiDAR viewer for discontinuity orientations. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 46: 543–554.



- Preston, R., Roberts, D., McIntire, H., Stead, D. (2014).** Use of photogrammetry and discrete fracture networks to characterize pillar damage and rock mass characteristics. International Discrete Fracture Network Engineering Conference, Canada.
- Priest, S., Hudson, J. (1981).** Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 18: 183–197.
- Rocscience. (2015).** RS-2 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes Software, Version 9.0, Rocscience Inc., Toronto.
- Strouth, A., Eberhardt, E., Hungr, O. (2006).** The use of LiDAR to overcome rock slope hazard data collection challenges at Afternoon Creek, Washington. 41st American Rock Mechanics Symposium, ARMA/USRMS, Paper 993.
- Sturzenegger, M., Stead, D. (2009).** Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engineering Geology, 106: 163–182.
- Styles, T.D., Zhang, Y., Stead, D. (2010).** A photogrammetric approach to brittle fracture characterization in mine pillars. 44th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Tonon, F., Kottensette, J. (2006).** Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. 41st U.S. Rock Mechanics Symposium, Colorado School of Mines Report on a Workshop, 120p.
- Tuckey, Z., Stead, D. (2016).** Improvements to field and remote sensing methods for mapping discontinuity persistence and intact rock bridges in rock slopes. Engineering Geology, 208: 136–153.
- Ulusay, R. (2015).** The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. International Society for the Rock Mechanics ISRM. Springer, London. 292p.
- Villaescusa, E., Brown, E. (1992).** Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements. Rock Mechanics & Rock Engineering, 25: 67–87.
- Villalobos, S., Cacciari, P., Futai, M. (2017).** Numerical modelling of the formation and instability of blocks around the Monte Seco tunnel excavated in a discontinuous rock mass. Revista Obras y Proyectos UCSC, 21: 54–64.
- Walton, G., Delaloye, D., Diederichs, M. (2014).** Development of an elliptical fitting algorithm to improve change detection capabilities with applications for deformation monitoring in circular tunnels and shafts. Tunnelling & Underground Space Technology, 43: 336–349.
- Zhang, L., Einstein, H. (2000).** Estimating the intensity of rock discontinuities. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 37: 819–837.

