

Advanced hydromechanical modeling of andesitic and granodiorite massifs applying the Hoek-Brown criterion for the stability of underground excavations

Aldo Yampier Zavaleta-Condor,¹ , Yerson Ciro Gonzales-Cruz,¹ , Walter Klysman Laiza-Vera, Ing.¹ , Manuel Alejandro Minaya-Masias, Msc.¹ , N00344427@upn.pe, N00337992@upn.pe, walter.laiza@upn.pe, manuel.minaya@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Abstract– *The study focuses on the advanced hydromechanical modeling of andesitic and granodioritic rock masses applying the Hoek-Brown criterion to evaluate the stability of underground excavations in the Phase2 software of Rocscience. The interactions between the pore pressure, the rock deformation, and the stress variations were analyzed under dry conditions, with a water table located at the contact between both rock masses, and seismic alterations using horizontal and vertical coefficients. The results demonstrate that the increase in the pore pressure reduces the effective strength of the rock mass, and this compromises the stability of the excavations. Under seismic conditions, the redistribution of stresses and the alteration of the stress state increase the susceptibility to deformation. These findings highlight the importance of incorporating efficient drainage and adaptive support systems to ensure the stability. In addition, the study highlights the need for an integrated geotechnical approach in the design of underground excavations.*

Keywords: *Hydromechanical modeling, Hoek Brown, andesites, granodiorites, stability, seismicity, excavations*

Modelación hidromecánica avanzada de macizos andesíticos y granodioríticos aplicando el criterio Hoek-Brown para estabilidad de excavaciones subterráneas

Aldo Yampier Zavaleta-Condor,¹ , Yerson Ciro Gonzales-Cruz,¹ , Walter Klysman Laiza-Vera, Ing. ¹ , Manuel Alejandro Minaya-Masías, Msc. ¹ , N00344427@upn.pe, N00337992@upn.pe, walter.laiza@upn.pe, manuel.minaya@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Resumen— El estudio se enfoca en la modelación hidromecánica avanzada de macizos rocosos andesíticos y granodioríticos aplicando el criterio de Hoek-Brown para evaluar la estabilidad de excavaciones subterráneas en el software Phase2 de Rocscience. Se analizaron las interacciones entre la presión de poros, la deformación de la roca y las variaciones de esfuerzos en condiciones secas, con nivel freático localizado en contacto de ambos macizos, y alteraciones sísmicas mediante coeficientes horizontal y vertical. Los resultados muestran que el aumento de la presión de poros reduce la resistencia efectiva del macizo rocoso, lo que compromete la estabilidad de las excavaciones. En condiciones sísmicas, la redistribución de esfuerzos y la alteración del estado tensional incrementan la susceptibilidad a la deformación. Estos hallazgos destacan la importancia de incorporar drenaje eficiente y sistemas de sostenimiento adaptativos para garantizar la estabilidad. Además, se resalta la necesidad de un enfoque geotécnico integral para diseñar excavaciones subterráneas.

Palabras clave: Modelación hidromecánica, Hoek Brown, andesitas, granodioritas, estabilidad, sismicidad, excavaciones.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de las excavaciones subterráneas en macizos andesíticos y granodioríticos depende críticamente de la interacción entre flujo de fluidos y deformación de la roca. En andesitas, se ha demostrado que el aumento de la porosidad inducido por microfracturas disminuye la resistencia a compresión uniaxial y, al mismo tiempo, incrementa la permeabilidad en varios órdenes de magnitud [1].

El comportamiento hidromecánico del macizo rocoso en andesitas y granodioritas condiciona la estabilidad de una excavación subterránea, donde las discontinuidades constituyen el principal escenario de riesgo. En tal sentido, se ve críticamente afectado por la saturación del nivel freático y los eventos sísmicos, generando concentraciones de esfuerzos que exigen sistemas de drenaje y sostenimiento adaptativo para garantizar la estabilidad estructural y la seguridad de los trabajadores durante la excavación subterránea.

Estudios experimentales muestran que las rocas con mayor porosidad retienen la presión de poro por periodos prolongados, alargando las condiciones de debilidad alrededor de las excavaciones; este comportamiento prolonga las condiciones de debilidad alrededor de las excavaciones y puede favorecer desprendimientos o deformaciones diferidas en macizos andesíticos alterados. Así mismo, mediante ensayos se evidencia que, conforme la andesita sufre alteración hidrotermal y se satura de agua, su capacidad para conducir y disipar calor se reduce de manera notable, mientras que la cantidad de calor que puede almacenar aumenta [2].

En el enfoque mecánico, comparaciones entre 13 litotipos de andesita muestran que, aun tras ciclos de humectación y secado o congelación y deshielo, las variaciones petrográficas dominan los cambios de resistencia, con valores de UCS que alcanzan hasta 271 MPa en andesitas silificadas [3].

En granodioritas fracturadas, el agua fluye mientras las grietas están abiertas; si la presión interna sube, las grietas se cierran y la roca deja de ser permeable. En contraste con las andesitas, las granodioritas presentan menor variabilidad estructural, aunque la permeabilidad también disminuye con la presión confinante [4]. Los estudios hidromecánicos bajo esfuerzos confinantes de hasta 40 MPa muestran descensos adicionales de la permeabilidad de un orden de magnitud, confirmando que la rigidez matricial controla la evolución hidráulica durante la excavación en el macizo rocoso [5]. En ambos casos, la relación de fluido y roca se acoplan controlando cómo se reparten las tensiones siendo esto esencial para diseñar sostenimientos y secuencias de excavación realmente seguras. El comportamiento hidromecánico del macizo rocoso.

En andesitas alteradas hidrotermalmente, el flujo de agua estructural asociada a la formación de minerales arcillosos y la disolución de feldspatos incrementa la porosidad conectada y, con ella, la permeabilidad de la matriz. Esta entrada de fluidos, reduce la resistencia del macizo y lo vuelve más susceptible a esfuerzos generados durante una excavación subterránea [7].

En minería subterránea, es común observar fenómenos de sismicidad inducida o microseísmos, los cuales se originan como respuesta a la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso tras la excavación. Estas vibraciones o incluso estallidos de roca, representan una respuesta dinámica del terreno ante la liberación súbita de energía acumulada en zonas altamente confinadas. Estos estudios destacan la importancia de incorporar coeficientes sísmicos apropiados en el diseño geotécnico [8].

A nivel internacional, Siratovich et al. (2014) realizaron un estudio sobre las propiedades físicas de la Rotokawa Andesite en Nueva Zelanda, demostrando que el aumento de la porosidad y la microfracturación inducida reducen significativamente la resistencia a compresión uniaxial, al mismo tiempo que incrementan la permeabilidad del macizo rocoso. Dicho comportamiento evidencia la fuerte interacción entre el flujo de fluidos y la deformación de la roca, influyendo directamente en la estabilidad de excavaciones subterráneas [9].

De igual forma, Vogler et al. (2018) analizaron experimental y numéricamente la respuesta hidromecánica de fracturas rugosas sometidas a inyecciones de fluidos a alta presión, concluyendo que la presión de poro puede modificar sustancialmente la permeabilidad y la rigidez del macizo, afectando la redistribución de esfuerzos alrededor de túneles y galerías [10].

A nivel regional, en La Libertad, Vargas (2017) desarrolló un estudio aplicado en la Compañía Minera MARSA, donde se evaluó el uso de desmonte zarandeado como agregado en shotcrete para el sostenimiento de rampas subterráneas, destacando que la cercanía entre planta de mezclado y frente de excavación optimiza el comportamiento mecánico del sostenimiento frente a la humedad del macizo. Este trabajo demostró la importancia de la interacción agua-roca en los procesos de deformación y resistencia de túneles [11].

Asimismo, Sifuentes, Suárez y Monago (2019), en su investigación sobre la reutilización de desmontes mineros en la mina El Laurel (provincia de Otuzco), evidenciaron que la saturación del macizo y la presión de poro en los niveles freáticos adyacentes influyen de manera directa en la durabilidad del shotcrete y en la estabilidad local del sostenimiento. Ambos estudios locales confirman que el comportamiento hidromecánico de las rocas en La Libertad presenta una relación directa con la variabilidad del nivel freático y las condiciones geotécnicas del terreno [12].

En este contexto, el criterio de Hoek-Brown es clave para caracterizar el comportamiento de macizos rocosos fracturados e intactos, considerando el grado de fracturación, la presión de poros, la presencia de agua subterránea y los efectos sísmicos representados mediante coeficientes sísmicos aplicados en andesitas y granodioritas [13].

El objetivo general del estudio es analizar el comportamiento hidro-mecánico de andesitas y granodioritas considerando su influencia en la estabilidad de excavaciones subterráneas. Entre los objetivos específicos, se busca caracterizar experimentalmente las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de ambas rocas; evaluar su respuesta frente a variaciones de presión de poro y esfuerzos confinantes; y modelar, mediante análisis numérico acoplado, la relación entre flujo y deformación para determinar el factor de seguridad hidromecánico y las convergencias admisibles. Estos objetivos permitirán identificar los factores de control del comportamiento del macizo rocoso, optimizando los criterios de sostenimiento y drenaje empleados en excavaciones subterráneas.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

La investigación es aplicada y no experimental, integra análisis documental y modelamiento numérico, para caracterizar el comportamiento hidromecánico de andesitas junto a granodioritas y evaluar su impacto en la estabilidad de túneles, galerías y cámaras subterráneas. De tal modo, se evalúa el comportamiento hidromecánico mediante el criterio de falla de Hoek Brown, integrando la influencia de porosidad con nivel freático y sismicidad para estimar la estabilidad del macizo mediante etapas en el software Phase2.

El enfoque busca comprender cómo el criterio aplicado de modelamiento explica el comportamiento hidromecánico de andesitas y granodioritas en excavaciones subterráneas, considerando la interacción entre presión de poro, esfuerzos y deformaciones del contorno. Su relevancia radica en que la estabilidad de túneles, galerías y cámaras depende de estos factores, más aún bajo condiciones de saturación y drenaje.

B. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación analiza, mediante la integración de datos experimentales y modelamiento numérico, el comportamiento hidromecánico de andesitas y granodioritas en excavaciones subterráneas, aplicando el criterio de Hoek Brown para determinar cómo la presión de poros asociada al nivel freático y la acción sísmica afectan la resistencia y estabilidad del macizo rocoso. El estudio se estructuró en tres etapas principales: (1) condición seca, donde se simuló el comportamiento inicial del macizo sin presencia de agua, con el fin de obtener la distribución base de esfuerzos y el factor de seguridad; (2) condición con nivel freático, en la cual se incorporó la presión intersticial para analizar su influencia sobre la reducción del esfuerzo efectivo y la deformabilidad del terreno; y (3) condición sísmica con nivel freático, aplicando coeficientes pseudoestáticos K_h y K_v para representar la respuesta dinámica del macizo bajo saturación. Estas simulaciones fueron desarrolladas en los programas RocLab y Phase2, empleando los parámetros m_i , m_b , s y a del modelo Hoek Brown ajustados según el grado de saturación.

C. Población

La población de esta investigación está conformada por los macizos rocosos formados por andesitas y granodioritas, los cuales definen sus comportamientos hidromecánicos bajo las condiciones de excavaciones subterráneas. Estos materiales, que son comunes en entornos volcánicos e intrusivos, presentan una amplia variedad de formaciones rocosas que pueden llegar a fracturarse, saturarse y experimentar cambios en la presión. Pues la estabilidad de estas formaciones se puede evaluar utilizando el criterio empírico de Hoek Brown.

D. Muestra

La muestra de la investigación estuvo conformada por un total de 22 registros geotécnicos e hidromecánicos, obtenidos a partir de 14 artículos científicos indexados, 4 tesis académicas y 4 documentos técnicos especializados, publicados entre los años 2014 y 2024. Estos registros corresponden a estudios realizados en macizos rocosos de tipo andesítico y granodiorítico en contextos de minería subterránea. Se consideraron como variables principales: resistencia a la compresión uniaxial (UCS), índice GSI, permeabilidad, presión de poros y parámetros del criterio Hoek-Brown (mi, mb, s y a).

E. Dimension de la muestra

La dimensión de la muestra se define según la calidad y consistencia de los registros geotécnicos seleccionados, considerando únicamente datos con parámetros completos del criterio de Hoek-Brown y condiciones hidrogeológicas definidas, excluyendo información incompleta o no validada. Los datos fueron organizados por litología (andesita y granodiorita) y condición hidráulica, y normalizados al Sistema Internacional de Unidades (SI), garantizando su confiabilidad en la modelación numérica.

F. Metodos de obtencion de informacion

Se empleó una revisión documental exhaustiva basándonos en fuentes de alto índice de confiabilidad, los valores obtenidos fueron verificados, organizados y clasificados para definir rangos representativos de cada litología. Posteriormente, estos datos se integraron en Phase2 para realizar un análisis a través de una modelación numérica en tres etapas, las cuales son: condiciones secas, presencia de nivel freático con presión de poros, y escenarios con influencia sísmica horizontal y vertical.

G. Software Rocscience

Rocscience es una empresa canadiense originada en la Universidad de Toronto, dedicada al desarrollo de software geotécnico avanzado para minería subterránea. Sus herramientas permiten optimizar el diseño de sostenimientos y fortalecer las condiciones de estabilidad en excavaciones subterráneas, contribuyendo a una gestión más segura y eficiente de las operaciones mineras [14].

H. Procedimiento en el software Phase 2

- Creación de galería (4.5m x 4.5m)
- Asignación de propiedades al macizo rocoso de Granodioritas y Andesitas.

- Creación de 3 etapas para su comportamiento.
- Ejecución de Análisis e intérprete del diseño.

I. Bases teoricas

1. Geological Strength Index (GSI) de Hoek Brown

El Índice de Resistencia Geológica (GSI) constituye un parámetro que describe la calidad general del macizo rocoso en función de su grado de fracturamiento y de la condición de las discontinuidades. Este índice integra la influencia de la estructura del macizo rocoso y del estado de las superficies de fractura sobre su comportamiento mecánico. En términos amplios, los valores elevados de GSI se asocian con macizos compactos y bien interconectados, mientras que valores bajos reflejan condiciones más alteradas por procesos de meteorización [14].

2. Porosidad y relación con criterio Hoek-Brown

a. Nivel Freático

El nivel freático es la superficie dentro del macizo rocoso donde la presión del agua en los poros es igual a la presión atmosférica (Fetter, 2018). Por encima de esta superficie, los poros pueden contener aire y agua en cantidades variables, mientras que por debajo de ella los poros y discontinuidades se encuentran totalmente saturados. Cuando el nivel freático asciende, la presión de poros aumenta y disminuye la resistencia del macizo; en cambio, al descender, los esfuerzos aumentan, mejorando la estabilidad del macizo rocoso (Hoek & Brown, 1980).

La tabla I clasifica cómo la presencia de agua afecta la estabilidad del terreno: desde zonas secas, hasta zonas completamente saturadas bajo el nivel freático.

TABLA I:
CLASIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN DE POROS.

Coeficiente de presión de poros	Valores	Condiciones hidrogeológicas
H_u	0	Zona seca
H_u	$0 < H_u < 1$	Zona parcialmente saturada o con filtración
H_u	1	Zona bajo nivel del agua

Según el criterio de Hoek-Brown, estos efectos se consideran usando los esfuerzos efectivos en lugar de los totales, ya que el agua reduce la capacidad resistente de la roca al actuar dentro de sus discontinuidades y poros. De acuerdo con los principios de la mecánica de rocas y suelos, la resistencia efectiva de un medio saturado se expresa:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Donde:

- ✓ σ' es el esfuerzo efectivo,
- ✓ σ es el esfuerzo total aplicado,
- ✓ u es la presión de poros.

b. Presión de Poros

La presión de poros (u) es la presión ejercida por el agua que está contenida en vacíos o discontinuidades. Su presencia reduce los esfuerzos efectivos (σ') los cuales controlan la resistencia real de la roca. Cuando la presión de los poros aumenta debido al ascenso del nivel freático, los esfuerzos efectivos disminuyen, reduciendo la resistencia al corte y favoreciendo la falla del macizo (Hoek & Brown, 1980). En cambio, cuando disminuye la presión este incrementa los esfuerzos efectivos, mejorando así la estabilidad estructural. En el criterio de Hoek-Brown, la presión se debe considerar en términos efectivos, modificando los esfuerzos principales de la ecuación:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(mb \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde:

- σ'_1 y σ'_3 : son esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura.
- σ_{ci} : Resistencia a la compresión uniaxial del material intacto.
- m , s y a : constantes del material intacto.

Para incorporar el efecto de agua en el análisis de resistencia:

1. Cálculo de esfuerzos efectivos σ'_1 y σ'_3 restando (u).
2. Aplicar los esfuerzos efectivos al criterio de falla para cuantificar el efecto hídrico en la estabilidad.

3. Sismicidad en el Macizo Rocoso

La sismicidad influye directamente en el comportamiento del macizo rocoso, pues los esfuerzos dinámicos generados por movimientos sísmicos alteran la presión de poros y el estado tensional del macizo rocoso. Durante un sismo, las vibraciones pueden producir una redistribución de esfuerzos y tener un incremento de la presión de los poros, especialmente en zonas con alto contenido de agua o con niveles freáticos elevados, lo cual disminuiría los esfuerzos efectivos, reduciendo así la resistencia del macizo.

Asimismo, la energía sísmica puede generar microfisuras, aumentando la porosidad y reducción del GSI, lo que se traduce una menor capacidad resistente (Brady & Brown, 2006). Por eso, en zonas sísmicamente activas, la aplicación del criterio de Hoek Brown debe tener ajuste empíricos o factores de reducción donde se considere la degradación del macizo y los efectos de las presiones de poros inducidas por vibraciones.

4. Coeficiente sísmico

El coeficiente sísmico es un factor adimensional que representa la acción sísmica sobre una estructura. Según Seed y Martin (1966), se aplica en análisis pseudoestático para estimar la estabilidad frente a movimientos sísmicos. En excavaciones subterráneas hechas en rocas andesitas y granodioritas, este coeficiente permite evaluar cómo las vibraciones son capaces de alterar los esfuerzos y la estabilidad del macizo rocoso. Según Kramer (1996), este coeficiente debe relacionarse con la aceleración esperada y debe ajustarse a condiciones específicas

y propias del macizo a excavar y al evento sísmico que se produzca en una labor minera, de tal manera se pueda reflejar con mayor exactitud el comportamiento real frente a esfuerzos en el macizo rocoso de andesitas y granodioritas.

La tabla II muestra que la componente sísmica vertical produce variaciones en el factor de seguridad y en la configuración de la superficie de deslizamiento, observándose un impacto limitado sobre la estabilidad general del túnel. Los valores del factor de seguridad tienden a ser menores en superficies curvas que en las lineales.

TABLA II:
VALORES DE FUERZA SÍSMICA VERTICAL

F_v/F_h		0	0.1	0.2	0.3	0.6
Superficie deslizante en curva	K_{sc}	0.894	0.901	0.908	0.916	0.938
	x_0/m	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
	x_1/m	10.068	10.125	10.189	10.260	10.461
	a_1	0.173	0.174	0.173	0.171	0.168
	a_2	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.007
Superficie deslizante lineal	K_{sl}	1.067	1.079	1.091	1.102	1.138
	x_0/m	5.885	5.902	5.918	5.932	5.966
	x_1/m	9.125	9.303	9.481	9.659	10.196
	k	3.342	3.212	3.091	2.979	2.687

En la tabla III, observamos valores de coeficientes sísmicos horizontales y verticales aplicados para el modelado de una excavación subterránea.

TABLA III:
COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTALES Y VERTICALES (KH, KV)

Autor	Kh	Kv	Aplicación
Towhata (2008)	0.10-0.20	0.05-0.10	En análisis pseudoestáticos de excavaciones subterráneas poco profundas.
Kaynia (2012)	0.15-0.25	0.07-0.12	Recomendable para macizos rocosos fracturados.
Barton (2013)	0.10-0.30	0.05-0.15	En rocas duras y condiciones de estabilidad crítica.

5. Clasificación de andesitas y granodioritas

Las andesitas: Es una roca ígnea volcánica, formada por el enfriamiento rápido del magma en la superficie terrestre, que se compone esencialmente de plagioclasa, acompañada de otros minerales como piroxeno o biotita. Esta roca suele tener texturas porfídicas que a menudo proporcionan un registro notable de la evolución de esta roca (Universidad de Alicante, 2020). Constan una resistencia intermedia, lo que lo convierte en una roca idónea para excavaciones subterráneas, aunque puedan presentar fracturas debido a los procesos hidrotermales, su clasificación permite estimar los parámetros del macizo

rocoso, tales como la resistencia a la compresión o también puede ser usado para el criterio de Hoek Brown para diseños de excavaciones subterráneas. Así mismo, las granodioritas: Es una roca plutónica que está compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa, son rocas maficas que son más frecuentes en biotitas y anfíbol (Atlas de Rocas Ígneas, 2013). Se diferencia del granito por que tiene una mayor proporción de plagioclasa que de feldespatos, esta composición le da una resistencia elevada mecánica, siendo así una de las rocas más estables y duras. Representa un material de alta competencia, lo que facilitara a las excavaciones con un sostenimiento, la presencia de diaclasas o fallas reducirán su resistencia. Por eso su correcta identificación y clasificación es importante para aplicar el criterio de Hoek Brown [16].

J. Desarrollo

- a) La imagen representa la geometría y las propiedades de los materiales definidas mediante el software Phase2 (Rocscience), junto con el área discretizada utilizada en el análisis del comportamiento hidromecánico de una excavación subterránea en un macizo rocoso. El modelo geotécnico está constituido por dos unidades litológicas: una capa superior compuesta por andesitas y una base de granodioritas. En ambos materiales se asumió un comportamiento elástico e isotrópico, empleando el criterio de falla de Hoek Brown para la simulación de su respuesta mecánica en condiciones secas, es decir sin presencia de presión de poros. Adicionalmente, se incorpora una secuencia geológica de carácter realista, en la cual la excavación se desarrolla dentro de una roca de mayor competencia y estabilidad, sometida a un régimen de carga más resistente en comparación con la unidad de andesitas.

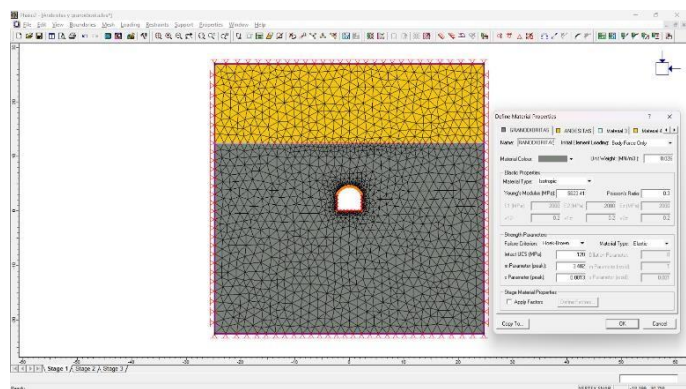


Fig. 1. Modelo numérico discretizado con asignación de propiedades para andesitas y granodioritas en la excavación subterránea

- b) En esta segunda imagen se aplicaron restricciones de desplazamiento en los bordes laterales y en la base del modelo, con el propósito de simular el confinamiento natural del terreno y evitar movimientos no deseados durante la simulación numérica. Asimismo, se asignó

una línea piezométrica o nivel freático entre ambas rocas de andesitas y granodioritas, a fin de representar la presencia y distribución del agua subterránea dentro del dominio analizado. Esta configuración permite incorporar las presiones de poro en el cálculo y obtener una representación más realista del comportamiento hidromecánico del sistema frente a la excavación subterránea.

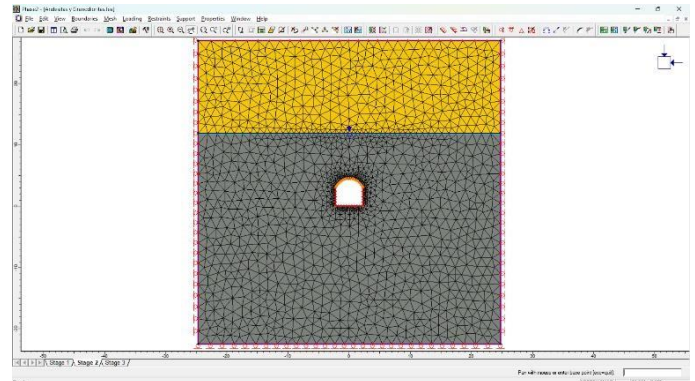


Fig. 2. Restricciones de desplazamientos y asignación de nivel freático

- c) La imagen corresponde a la tercera etapa del análisis sísmico realizado en Phase2, donde se aplicaron cargas pseudoestáticas para simular la acción del sismo sobre el macizo rocoso. Se establecieron un coeficiente horizontal de +0.30 y un coeficiente vertical de +0.15, orientados hacia la derecha y hacia arriba respectivamente. La componente horizontal representa la aceleración lateral principal del movimiento sísmico, mientras que la vertical simula la fase en la que la masa rocosa se acelera hacia arriba, reduciendo el peso efectivo y el confinamiento. Dicha condición es considerada crítica y conservadora para evaluar la estabilidad del terreno. Por ello, los valores de k_h y k_v aplicados en la tercera etapa, resultan apropiados para representar la respuesta del macizo compuesto por andesitas y granodioritas frente a solicitaciones sísmicas.

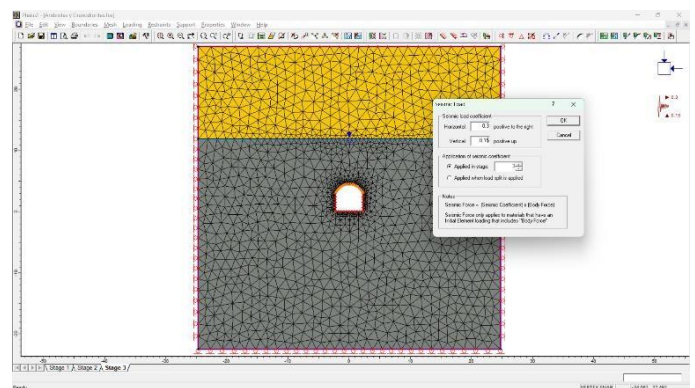


Fig. 3. Asignación de coeficientes sísmicos pseudoestáticos en el modelo numérico del macizo rocoso

III. RESULTADOS

- 1) Primer resultado: Distribución de esfuerzo efectivo σ en condición seca del macizo rocoso

En etapa 1 el macizo rocoso conformado por andesitas y granodioritas, presentó un comportamiento estable bajo condición seca. Los parámetros definidos mediante el criterio de Hoek Brown con una UCS de 120 MPa para la granodiorita y 55 MPa para la andesita, módulos de Young de 5623.41 MPa y 1490.5 MPa, y un coeficiente de Poisson de 0.3 reflejaron una respuesta elástica en la excavación. El campo de esfuerzo efectivo principal (σ_1) mostró valores máximos de hasta 2.20 MPa concentrados en la corona y el hastial inferior, mientras que las zonas externas del dominio mantuvieron tensiones inferiores a 0.5 MPa, lo cual indica una redistribución simétrica de esfuerzos sin presencia de plastificación. La ausencia de presión de poros confirmó la estabilidad estructural del macizo, se obtuvieron valores del factor de seguridad mayores a 2.0 en casi todo el dominio del modelo, mientras que los mínimos, comprendidos entre 1.0 y 1.5, se concentraron en la corona, hastiales y solera de la excavación. Dichas áreas reflejan la redistribución natural de esfuerzos ocasionada por el alivio de carga producto del proceso de excavación. No se identificaron zonas con comportamiento plástico, lo que indica una respuesta predominantemente elástica y confinada del macizo rocoso, manteniéndose en equilibrio estático y evidenciando una estabilidad estructural adecuada bajo las condiciones secas consideradas en el modelo.

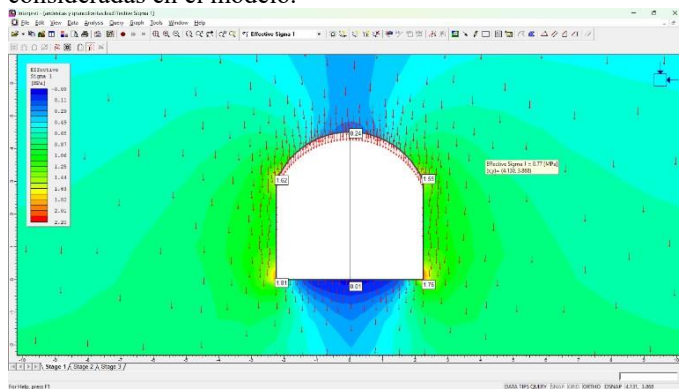


Fig. 4. Esfuerzos efectivos en condiciones secas

- 2) Segundo resultado: Distribución del esfuerzo efectivo σ_1 , presión de poros en el macizo con nivel freático y factor de seguridad.

En etapa 2 se consideró la introducción de un nivel freático a una altura determinada cerca de la base de andesita, con el objetivo de evaluar la influencia de la presión intersticial sobre el comportamiento hidromecánico del macizo rocoso compuesto por andesitas y granodioritas. Bajo estas condiciones, se registró un incremento progresivo de la presión de poros, alcanzando valores de hasta 0.36 MPa en la parte inferior y en los hastiales, mientras que en la corona la presión fue prácticamente nula. Esta distribución provocó una reducción del esfuerzo efectivo principal (σ_1), cuyos máximos

disminuyó hasta aproximadamente 1.87 MPa, concentrándose principalmente en la corona y solera de la excavación, lo que refleja una disminución total a la condición seca inicial.

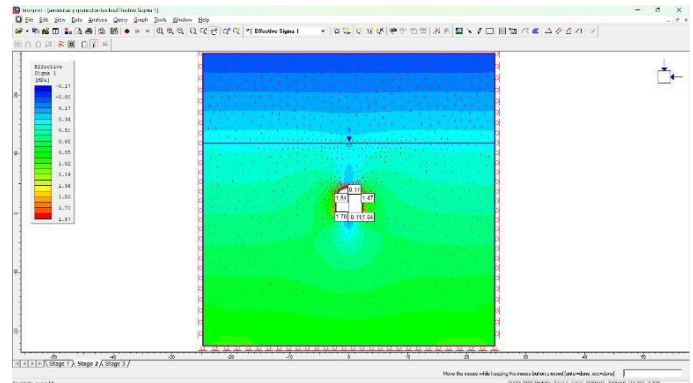


Fig. 5. Esfuerzo efectivo principal en nivel freático

Durante la etapa 2, que incluyó la influencia del nivel freático, se registró una reducción del factor de seguridad con valores que oscilaron entre 1.0 y 3.0, y un promedio cercano a 1.8. Las zonas más afectadas se concentraron en el contorno excavado, especialmente en los hastiales inferiores, donde el incremento de la presión de poros generó un alivio de confinamiento y una disminución en la resistencia efectiva del macizo. A pesar de ello, el sistema mantuvo una estabilidad general aceptable, sin alcanzar condiciones de colapso estructural.

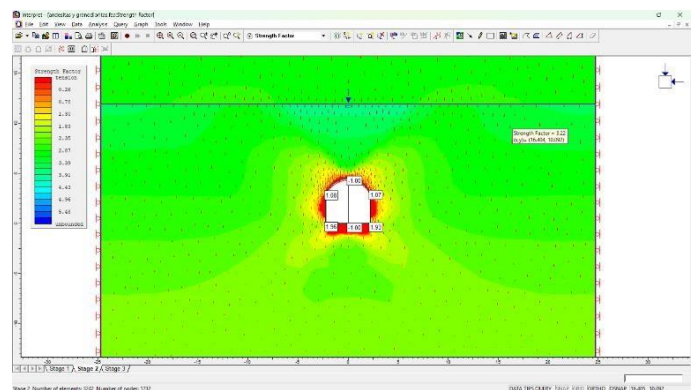


Fig. 6. Respuesta del factor de seguridad con nivel freático

- 3) Tercer resultado: Distribución del esfuerzo efectivo principal σ_1 , presión de poros y factor de seguridad en condición sísmica con nivel freático.

En la etapa 3 se evaluó el comportamiento del macizo rocoso conformado por andesitas y granodioritas bajo la acción combinada del nivel freático y la sollicitación sísmica, mediante la aplicación de coeficientes pseudoestáticos $k_h = 0.30$ y $k_v = 0.15$. Esta configuración permitió representar un escenario dinámico de mayor exigencia estructural, donde la interacción entre las presiones de poro y las aceleraciones sísmicas generó una redistribución compleja de esfuerzos en el entorno de la excavación. La presión intersticial mantuvo un patrón ascendente similar al observado en la etapa anterior, con valores

máximos de aproximadamente 0.36 MPa en la zona inferior, mientras que el esfuerzo efectivo principal σ_1 presentó una disminución adicional, alcanzando valores máximos cercanos a 1.78 MPa, localizados principalmente en la corona y los hastiales inferiores.

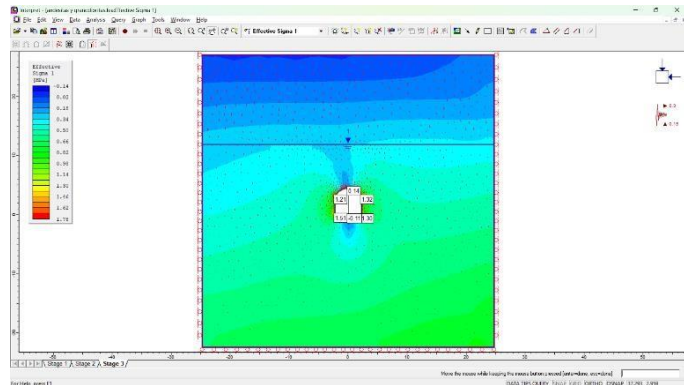


Fig. 7. Distribución de esfuerzos efectivos bajo condiciones sísmicas.

Así mismo, la presión de poros (u) mantuvo un comportamiento similar al de la etapa anterior, con un gradiente ascendente desde la base hacia la superficie del modelo. Los valores máximos alcanzaron alrededor de 0.36 MPa en la parte inferior y disminuyeron hasta 0.07 MPa cerca de la corona de la excavación, siendo casi nulos en la parte superior. La acción sísmica generó ligeras variaciones locales en los hastiales y la solera, sin afectar la estabilidad global. En general, la combinación entre la saturación del macizo y las cargas sísmicas produjo incrementos puntuales de presión intersticial, confirmando su influencia en la reducción de los esfuerzos efectivos y del factor de seguridad.

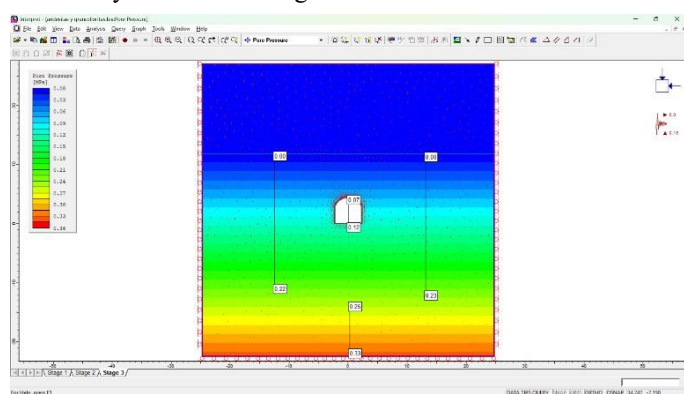


Fig. 8. Distribución de presión de poros bajo nivel freático en andesitas y granodioritas.

De igual manera, en el factor de seguridad se evidenció una disminución significativa en la estabilidad del macizo rocoso conformado por andesitas y granodioritas, al incorporar la influencia combinada del nivel freático y la acción sísmica. Los coeficientes aplicados ($k_h = 0.30$ y $k_v = 0.15$) generaron una condición de carga dinámica que incrementó la redistribución de esfuerzos y la presión intersticial en el entorno de la excavación. Los valores del factor de seguridad oscilaron entre 1.0 y 2.0, con un promedio global cercano a 1.5, mostrando un claro descenso respecto a las etapas previas. Las zonas críticas de menor estabilidad se localizaron en la corona, hastiales y

solera, donde se observó una concentración de esfuerzos y deformaciones, evidenciada por la aparición de tonalidades rojas en el contorno del túnel. Este patrón refleja un comportamiento plástico localizado, asociado a la pérdida parcial de confinamiento y a la reducción de los esfuerzos efectivos producto de la interacción sísmico-hidráulica. En contraste, las áreas más externas del dominio mantuvieron valores de factor de seguridad superiores a 2.0, correspondientes a sectores donde el efecto dinámico resultó menos significativo.

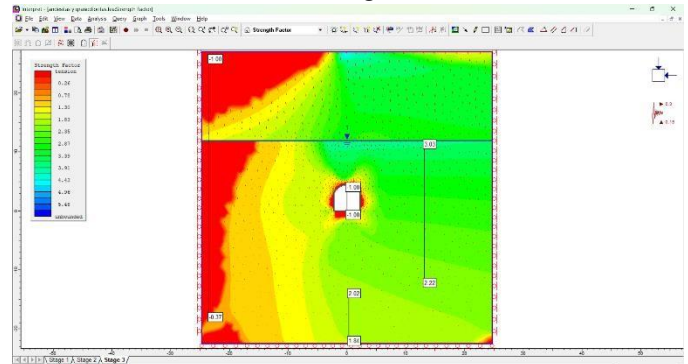


Fig. 9. Factor de seguridad bajo condición sísmica con nivel freático.

Con el fin de validar los resultados obtenidos, estos fueron contrastados cualitativamente con estudios previos desarrollados en macizos rocosos similares en minería subterránea, donde se ha evidenciado que el incremento de la presión de poros reduce los esfuerzos efectivos y el factor de seguridad. Esta comparación permite respaldar la coherencia del modelo numérico empleado, aun cuando no se dispone de datos in situ.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la saturación del macizo rocoso y el aumento de la presión de poros son factores críticos que inciden directamente en la disminución de la resistencia efectiva y en la estabilidad global de los túneles y galerías subterráneas. El ascenso del nivel freático incrementa la presión intersticial dentro de las discontinuidades y fracturas, reduciendo la capacidad del macizo para soportar esfuerzos cortantes y provocando una redistribución desfavorable de las tensiones en el entorno excavado. Este comportamiento se traduce en una mayor susceptibilidad a la deformación plástica y en la aparición de zonas de potencial inestabilidad alrededor del sostenimiento. En consecuencia, se evidencia la necesidad de diseñar e implementar sistemas de drenaje subterráneo más eficientes, capaces de controlar la infiltración y mantener los esfuerzos efectivos dentro de rangos estables, junto con sostenimientos adaptativos que respondan a las variaciones hidráulicas y geomecánicas del terreno. Estas acciones permiten optimizar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil de las estructuras y reducir los impactos ambientales derivados de la interacción agua-roca, lo que fortalece el principio de producción y consumo responsable dentro del contexto de una minería sostenible.

Asimismo, la incorporación de condiciones sísmicas en la modelación numérica permitió un entendimiento más profundo

del comportamiento dinámico del macizo rocoso bajo escenarios donde las vibraciones sísmicas se acoplan al nivel freático. Los resultados evidenciaron que esta interacción genera un aumento en la presión intersticial transitoria y una alteración significativa del estado tensional del macizo, lo que produce incrementos en las zonas críticas de deformación y reducción del confinamiento efectivo. Dichas variaciones se reflejan en la disminución del factor de seguridad y en la aparición de concentraciones de esfuerzo en la corona y los hastiales inferiores de la excavación. Este hallazgo demuestra la importancia de incorporar el acoplamiento sismo-hidráulico en los análisis geotécnicos, a fin de anticipar los efectos combinados de los eventos sísmicos y las condiciones hidrogeológicas en la estabilidad del terreno. De este modo, se orienta el diseño de infraestructuras subterráneas resilientes, capaces de mantener su integridad estructural frente a escenarios de cambio climático y riesgos geológicos, reforzando la adaptación y la gestión preventiva en entornos sísmicamente activos.

La metodología aplicada, basada en el criterio empírico de Hoek Brown y en simulaciones numéricas con el software Phase2 (Rocscience), demostró ser una herramienta científica sólida para reproducir el comportamiento hidromecánico del macizo rocoso con alto grado de precisión. Su aplicación permitió cuantificar la influencia de la presión de poros, el confinamiento y las sollicitaciones sísmicas sobre la redistribución de esfuerzos y el factor de seguridad, brindando una aproximación confiable para la toma de decisiones geotécnicas. Este enfoque metodológico es replicable en otras regiones mineras del Perú, ya que integra parámetros geológicos y geomecánicos específicos de cada yacimiento, promoviendo el uso de herramientas de modelamiento avanzado y análisis de estabilidad tridimensional. Su implementación impulsa una minería tecnológicamente moderna, ambientalmente responsable y alineada con criterios de sostenibilidad, al optimizar los diseños de sostenimiento y drenaje, reducir el riesgo de fallas estructurales y fortalecer la gestión integral de los recursos geotécnicos.

Los resultados obtenidos confirman que la ingeniería aplicada a la sostenibilidad ambiental es una vía efectiva para minimizar riesgos estructurales, optimizar el uso de materiales y energía, y garantizar la seguridad de las comunidades cercanas a las operaciones mineras. La integración de la variable ambiental en los procesos de diseño geotécnico contribuye a un equilibrio entre la eficiencia técnica y la protección del entorno natural, promoviendo una minería subterránea responsable y de bajo impacto. Asimismo, la aplicación de estrategias de drenaje, monitoreo de presión de poros y evaluación de respuesta sísmica refuerza la prevención de deslizamientos, colapsos y fallas progresivas, asegurando la continuidad operativa sin comprometer los ecosistemas locales. En este sentido, la investigación consolida una visión integral de desarrollo técnico, ambiental y social, donde la innovación geotécnica se convierte en un pilar para la sostenibilidad de la infraestructura minera, en concordancia con los compromisos internacionales de mitigación y adaptación al cambio climático.

REFERENCIAS

- [1] A. Ceccato, G. Viola, G. Tartaglia, and M. Antonellini, "In-situ quantification of mechanical and permeability properties on outcrop analogues of offshore fractured and weathered crystalline basement: Examples from the Rolvsnes granodiorite, Bømlo, Norway," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 135, art. 105373, 2022.
- [2] A. Nicolas, G. Blöcher, C. Kluge, Z. Li, H. Hofmann, L. Pei, H. Milsch, J. Fortin, and Y. Guéguen, "Pore pressure pulse migration in microcracked andesite recorded with fibre optic sensors," *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol. 24, art. 100183, 2020.
- [3] Atlas Digital de Petrología Ígnea y Metamórfica. Universidad de Alicante, "Andesita," Atlas Digital de Petrología Ígnea y Metamórfica, octubre 31, 2020.
- [4] B. Czinder and Á. Török, "Strength and abrasive properties of andesite: relationships between strength parameters measured on cylindrical test specimens and micro-Deval values—a tool for durability assessment," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 79, pp. 8879–8890, 2020.
- [5] C. Delayre, P. Patrier Mas, P. Sardini, P. Cosenza, and A. Thomas, "Quantitative evolution of the petrophysical properties of andesites affected by argillic alteration in the hydrothermal system of Petite Anse-Diamant, Martinique," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 401, art. 106927, 2020.
- [6] D. Vogler, R. R. Settgast, C. Annavarapu, C. Madonna, P. Bayer and F. Amann, "Experiments and simulations of fully hydro-mechanically coupled response of rough fractures exposed to high-pressure fluid injection," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 123, pp. 5015–5035, 2018.
- [7] E. Hoek, C. Carranza-Torres, and B. Corkum, "Hoek–Brown failure criterion-2002 edition," *Proceedings of NARMS–TAC Conference*, vol. 1, 2002.
- [8] F. Palmezano, "Geological Strength Index (GSI) aplicado al análisis geomecánico de macizos rocosos fracturados", *Revista de Ingeniería Geotécnica y Minera*, vol. 9, pp. 115–123, 2021.
- [9] M. J. Heap, D. E. Jessop, F. B. Wadsworth, M. Rosas-Carbajal, J.-C. Komorowski, H. A. Gilg, N. Aron, M. Buscetti, L. Gentil, M. Goupil, M. Masson, L. Hervieu, A. R. L. Kushnir, P. Baud, L. Carbillet, A. G. Ryan, and R. Moretti, "The thermal properties of hydrothermally altered andesites from La Soufrière de Guadeloupe (Eastern Caribbean)," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 421, art. 107444, 2022.
- [10] Olivares Allendes, J. A. (2023). Revisión de métodos de estimación de coeficientes sísmicos horizontales en depósitos de relaves chilenos. Universidad de Chile.
- [11] P. A. Siratovich, M. J. Heap, M. C. Villeneuve, J. W. Cole and T. Reuschlé, "Physical property relationships of the Rotokawa Andesite, a significant geothermal reservoir rock in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand," *Geothermal Energy*, vol. 2, art. 10, 2014.
- [12] Parra Silva, M. A. (2022). Diseño sísmico paramétrico de túneles mediante métodos numéricos e inteligencia artificial. Universidad de Chile
- [13] Rocscience Inc., Software geotécnico para análisis de excavaciones subterráneas. Toronto, Canadá: Universidad de Toronto, 2024.
- [14] Sifuentes Suárez, R. and Monago, E. (2019). Reutilización de desmontes mineros como agregado en concreto proyectado para sostenimiento subterráneo, mina El Laurel – Otuzco, La Libertad. Universidad Privada del Norte, Trujillo.
- [15] Universidad de Chile, Modelos estadísticos de peligro sísmico aplicados a minería de Panel Caving. Santiago de Chile: Repositorio Académico de la Universidad de Chile, 2019.
- [16] Vargas Niquín, N. (2017). Optimización del sostenimiento con shotcrete usando desmonte zarandeado como agregado, en la construcción de la rampa principal – MARSa. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.