

Mathews Empirical Method to Determine the Stability Zone of Underground Stopes in an Artisanal Mine in Central Coastal Peru

Steven Huaman-Rapri¹; Neil Rojas-De la Vega²; Humberto Pehovaz-Alvarez³

^{1,2,3}Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Peru, u201921775@upc.edu.pe,
u201916140@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe

Abstract—The geomechanical evaluation of stopes is a critical component in any mining operation, especially in artisanal mines. This study focuses on the Buena Gracia artisanal mine, located on the central coast of Peru, with the objective of determining the stability zone of its stope. The Mathews empirical method is employed for this purpose, providing a graphical representation that clearly distinguishes stable and unstable zones. This representation facilitates decision-making in the design and control of the underground environment. Empirical methods in geomechanics are vital in mining, allowing for a rapid and accurate assessment of geological structure stability based on observations and previous experiences. These methods enable informed decision-making and improve mining operation safety. To calculate the Mathews method factors, two specialized software tools are used: RS2, which calculates the maximum induced compression stress value (σ_{max}) for factor A; and Dips, which identifies the main discontinuity families for factor B. These factors, along with factor C and Barton's Q , determine the stability number (N'). This stability number, combined with the stope's hydraulic radius, provides the underground stope stability zone. The study successfully identified the stable zones of the stope surfaces, highlighting the importance of empirical methods in artisanal mining and demonstrating how combining these methods with modern technology can improve stope safety.

Keywords— Stope Stability, Mathews Chart, Safety, Artisanal Mining, Empirical Method.

Método Empírico de Mathews para Determinar la Zona de Estabilidad de los Tajos Subterráneos en una Mina Artesanal en la Costa Central del Perú

Steven Huaman-Rapri¹; Neil Rojas-De la Vega²; Humberto Pehovaz-Alvarez³

^{1,2,3}Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Peru, u201921775@upc.edu.pe,
u201916140@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe

Resumen– La evaluación geomecánica de los tajos es un componente crítico en cualquier operación minera, especialmente en las minas artesanales. Este estudio se centra en la mina artesanal Buena Gracia, ubicada en la costa central del Perú, con el objetivo de determinar la zona de estabilidad de su tajo. Para ello, se emplea el método empírico de Mathews, el cual proporciona una representación gráfica que distingue claramente las zonas estables de las inestables. Esta representación facilita la toma de decisiones en el diseño y control del entorno subterráneo. Los métodos empíricos en geomecánica son fundamentales en minería, ya que permiten una evaluación rápida y precisa de la estabilidad de las estructuras geológicas, basándose en observaciones y experiencias previas. Estos métodos permiten tomar decisiones informadas y mejorar la seguridad en las operaciones mineras. Para calcular los factores del método de Mathews, se utilizaron dos herramientas de software especializadas: RS2, que calcula el valor máximo del esfuerzo de compresión inducido (σ_{max}) para el factor A; y Dips, que identifica las principales familias de discontinuidades para el factor B. Estos factores, junto con el factor C y el índice Q de Barton, determinan el número de estabilidad (N'). Este número de estabilidad, combinado con el radio hidráulico del tajo, proporciona la zona de estabilidad del tajo subterráneo. El estudio logró identificar con éxito las zonas estables de las superficies del tajo, destacando la importancia de los métodos empíricos en la minería artesanal y demostrando cómo la combinación de estos métodos con tecnología moderna puede mejorar la seguridad de los tajos.

Palabras clave– Estabilidad del Tajo, Gráfico de Mathews, Seguridad, Minería Artesanal, Método Empírico.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de los tajos subterráneos en proyectos mineros representa un desafío significativo en la ingeniería geotécnica, exigiendo una comprensión detallada y precisa para garantizar operaciones seguras y eficientes, en el año 2022 el 29% de accidentes mortales en el Perú que ocurrieron producto de derrumbes en las labores mineras [1]. Esto subraya la importancia de realizar estudios de prevención y desarrollo en la minería, ya que estos accidentes son una de las principales causas de muerte entre los trabajadores. Por lo tanto, la optimización de los parámetros estructurales del tajo debe abordarse desde dos perspectivas: la producción segura y el beneficio económico [2]. La presente investigación se centra en la aplicación del método gráfico de Mathews, que es un método empírico, como un instrumento que se adapta perfectamente al escenario de una pequeña minería para determinar la estabilidad de los tajos subterráneos en este

contexto específico [3]. La estabilidad de los tajos subterráneos se convierte así en un problema crítico y actual que demanda soluciones novedosas. Esta investigación se basa en el conocimiento existente sobre la estabilidad geotécnica en proyectos mineros, incorporando una revisión exhaustiva de esfuerzos de investigación previos en la materia. Los esfuerzos de investigación sentarán las bases para futuras investigaciones debido a que es una mina artesanal que recién está empezando.

Además, la singularidad y complejidad del proyecto requieren un enfoque especializado, para esto se requiere información detallada de la evolución del Método Gráfico de Mathews que ha tenido durante el tiempo [4]. De esta manera se logra constatar la evolución y mejoras que se han desarrollado a lo largo de diferentes investigaciones, lo cual nos ayudará a analizar y comprender para aplicarlo en nuestro escenario. Según diversos estudios [5], [6], [7] el método empírico de Mathews no se recomienda para su uso directo debido a su antigüedad, sino que debe ser adaptado a las necesidades actuales. Con el tiempo, se han introducido más casos prácticos y se han propuesto modificaciones al gráfico original de Mathews. Estas adaptaciones ofrecen una visión más actualizada y precisa de la estabilidad de los tajos. Se propuso el desarrollo de un nuevo gráfico de estabilidad para el diseño de excavaciones, basándose en el número de estabilidad modificado (N') propuesto por Potvin en 1988 [8]. Como resultado, se creó el Gráfico de Estabilidad Consolidado de Mathews, un innovador gráfico de diseño empírico para técnicas de minería subterránea.

La motivación es evaluar diferentes dimensiones del tajo usando el software Phase 2D para determinar su estabilidad en una mina artesanal. La investigación tiene como objetivo contribuir al desarrollo de herramientas y técnicas que permitan a los profesionales de la minería tomar decisiones informadas y salvaguardar la seguridad de los trabajadores en el entorno minero. A lo largo de esta investigación, se presentará la propuesta de investigación, delineando el método gráfico de Mathews como una herramienta eficaz para abordar la estabilidad en tajos subterráneos. La organización del artículo seguirá un formato lógico y progresivo, permitiendo sumergirse de manera coherente en el problema, la metodología, y las conclusiones de esta investigación.

II. ESTADO DEL ARTE

La literatura especializada presenta una variedad de estudios centrados en la inestabilidad de los tajeos en minas subterráneas y superficiales. Se actualizaron el gráfico de estabilidad para minas de tajo abierto utilizando modelización y simulación de elementos finitos para determinar un intervalo razonable para la anchura de la franja [9]. En el ámbito de la minería subterránea, examinaron la estabilidad de cámaras susceptibles a relajación de estrés, mientras que se mejoraron el método de Mathews considerando el impacto del estrés en el macizo rocoso [10], [11]. Además, la aplicación de redes neuronales en minería, aunque limitada, es prometedora [12]. Además, aplicaron técnicas de aprendizaje automático para predecir la estabilidad de excavaciones subterráneas utilizando una base de datos de estudios de Potvin (1988), mejorando la seguridad y eficiencia en la extracción de minerales [13], [8]. Se discutieron la importancia de evaluar la aplicabilidad de métodos empíricos para controlar la dilución y predecir la estabilidad de la mina, validándolos con métodos analíticos y numéricos [14]. En un contexto similar, desarrollaron un modelo numérico para examinar la deformación de la roca mineral durante la extracción, y también se detalló el diseño de sistemas de soporte de cable bolt para minas subterráneas, utilizando el gráfico de estabilidad de Mathews para predecir el tamaño de excavación estable [15], [16]. Por último, evaluaron la estabilidad de una cámara en una masa de roca de sal bajo condiciones de campos de esfuerzos secundarios, un aspecto frecuentemente ignorado en la minería subterránea [17].

Por otro lado, diferentes estudios [18], [19], [20], [21] evalúan diferentes métodos, añadiendo algoritmos de predicción para proporcionar soluciones a los casos de estudio. Se evaluaron el efecto de los regímenes de tensiones de roca y su relación con la profundidad del tajo utilizando el criterio elastoplástico Mohr-Coulomb y el software RockScience 2D, encontrando que a medida que aumenta la profundidad del tajo y la tensión in situ, la estabilidad se deteriora. De manera similar, se analizaron la estabilidad del tajo evaluando el ángulo de buzamiento del depósito y descubrieron que el aumento del ancho del tajo y una referencia de altura de 40 m deterioran la estabilidad del tajo, aunque a alturas más cortas la estabilidad mejora con el ancho [19]. En adición, también utilizaron un modelo numérico elastoplástico tridimensional con el software Abaqus para estimar la estabilidad del tajo y comprender mejor las zonas de desplazamiento y fallas, en contraste, otros autores emplearon el método de elementos finitos para calcular el factor de seguridad alrededor del tajo y evaluar los esfuerzos principales y secundarios, mientras que otros utilizaron RockScience para producir escenarios desde las mejores hasta las peores condiciones geotécnicas, correlacionándolos con gráficos de estabilidad [20], [21], [22].

Aunque el método de elementos finitos es comúnmente usado, existen otros métodos como el de elementos discretos. Se investigaron las propiedades de tracción en rocas conjuntas mediante un modelo numérico que considera el módulo de

Young, esencial para el análisis de estabilidad [23]. Continuando con modelos numéricos, [24] basados en un modelo desarrollado por Diaz et al. [25], usaron FLAC3D v6 para simular la tensión en las paredes del tajo, permitiendo estimar la estabilidad considerando variables como la calidad del macizo rocoso y la relajación de tensiones. Además, se combinaron la simulación numérica con métodos empíricos utilizando FLAC3D para evaluar la estabilidad del macizo rocoso, desarrollando el dimensionamiento de los tajeos de forma más segura [26]. Aunque existen diferentes modelos para evaluar la estabilidad de los tajeos, el gráfico de estabilidad de Mathew sigue siendo ampliamente utilizado. En este contexto, identificaron diferencias entre el gráfico de estabilidad original y los límites modificados por diferentes autores, resultando en un gráfico refinado (RSG) [27].

Por otro lado, [28] proponen un sistema de clasificación del macizo rocoso que facilita la evaluación de la rigidez y el módulo elástico, estableciendo una base sólida para la aplicación de los modelos de estabilidad. Los métodos empíricos se utilizan comúnmente para diseños preliminares, proporcionando una forma rápida de estimar tensiones y factores alrededor de un tajo [13],[8]. Sin embargo, [29] propusieron un método semi empírico que estima tensiones principales inducidas, validado mediante simulaciones numéricas. Con el paso del tiempo, se han implementado modificaciones al gráfico original de Mathews para brindar una visión más actualizada y precisa de la estabilidad de los tajeos [30], [29]. En este sentido, [6] desarrollaron un nuevo gráfico de estabilidad basado en el número de estabilidad modificado de Potvin (1988), creando el Gráfico de Estabilidad Consolidado de Mathews. Entonces, se subrayan la necesidad de considerar la calidad del macizo rocoso en los métodos de evaluación de estabilidad [30].

III. APORTE

El diseño de un tajo subterráneo es uno de los procesos fundamentales para la operación minera. Tener parámetros razonables de la estructura de este son un medio eficaz para garantizar una producción segura y eficiente. Estos parámetros son decisivos en la estabilidad del tajo y afectan los beneficios económicos de la minería [23]. Por ello, se debe analizar estos parámetros, debido que cuando existe demasiados parámetros estructurales, esto provocará inestabilidad y derrumbe del mineral y de roca, aumentando el desmonte que no ha sido contemplado en los límites del diseño, lo cual hace que sea imposible operar con normalidad y seguridad. Además, cuando los parámetros estructurales del tajo son muy pocos, conduce a un minado largo y una baja recuperación de mineral, lo que hace reducir los beneficios económicos [14]. En este contexto, el Método Gráfico de Estabilidad de Mathews emerge como una herramienta invaluable para la evaluación de la estabilidad en proyectos subterráneos.

El aporte principal de la presente investigación se enfoca en brindar una alternativa para evaluar la estabilidad en un

tajeo de una mina subterránea artesanal mediante el Método Gráfico de Mathews y el uso del software Phase 2D de Rocscience.

Se inicia con la selección entre 4 y 6 ubicaciones estratégicas para la extracción de muestras representativas del macizo rocoso y la ubicación de las Estaciones Geomecánicas (EG) en el crucero y la galería, asegurando que reflejen las condiciones reales en el sitio. Posteriormente, se procederá con la limpieza de las cajas donde serán las posibles ubicaciones de las EG según el tipo de litología. Para conocer las familias de discontinuidades, se ubicará las EG y después se evaluarán las condiciones de las discontinuidades. Luego, se clasifica el macizo rocoso utilizando el Índice de Masa Roca (RMR) para evaluar su calidad general. La calidad del macizo rocoso se evalúa también a través del Índice Q de Barton y se determinará el Índice de Calidad del Macizo Rocosos (RQD). Con estos datos, se procederá al análisis en profundidad, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del macizo rocoso. Finalmente, se elaborará un informe geotécnico que incluya todos los resultados, análisis e interpretaciones y medidas de estabilización si es necesario. Este enfoque integral garantiza una caracterización precisa del macizo rocoso, esencial para continuar con el método de Mathews. Como estadística, se utilizará el gráfico de dispersión para correlacionar los sistemas de clasificación RMR89 y Q74. La selección de las ubicaciones estratégicas para la extracción de muestras es una etapa crítica en el proceso, ya que estas deben ser representativas de las condiciones generales del macizo rocoso. Además, la limpieza y preparación adecuada de las cajas asegura que las mediciones y observaciones sean precisas y fiables. La clasificación del macizo rocoso usando índices internacionalmente reconocidos como el RMR y el Q proporciona una base sólida para analizar e interpretar los datos geotécnicos. Estos índices permiten una evaluación comparativa de la calidad del macizo rocoso y facilitan la toma de decisiones informadas sobre las medidas de estabilización necesarias.

Se extraerán 4 muestras de roca de la caja, piso, techo y estructura mineralizada, con dimensiones geométricas de aproximadamente 30x30x30 cm. Estas muestras no deben tener discontinuidades y su alteración debe ser mínima. Se utilizará un Hilti punta y comba para la extracción, con la ayuda del ingeniero geólogo de guardia para asegurar la calidad de las muestras. Se marcarán las dimensiones establecidas, martillando con la punta y comba hasta alcanzar una profundidad promedio de 2 cm, y luego se usará el Hilti hasta llegar a los 30 cm para extraer la muestra. Las muestras se transportarán al laboratorio de GEOMECH, donde se realizarán ensayos de propiedades físicas, constantes elásticas, compresión triaxial y resistencia a la compresión uniaxial, siguiendo las normas ASTM y las sugerencias del ISRM. Los resultados proporcionarán información sobre la capacidad de carga, deformación y durabilidad de la roca y el macizo rocoso. El proceso de extracción y preparación de muestras es fundamental para garantizar que los ensayos de laboratorio

reflejen con precisión las condiciones reales del macizo rocoso. La utilización de técnicas y herramientas adecuadas para la extracción minimiza el riesgo de dañar las muestras, asegurando que estas sean representativas y estén en condiciones óptimas para el análisis. Los ensayos de laboratorio, realizados según normas internacionales, proporcionan datos cruciales sobre las propiedades físicas y mecánicas de la roca, esenciales para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y estrés.

Luego, se calcularán los distintos parámetros necesarios para emplear el método gráfico de Mathews. Las actividades incluyen determinar el Factor A a partir del esfuerzo vertical y horizontal, usando la constante "k" de Sheorey (1994), y el software Rockscience2D para obtener los esfuerzos de compresión inducidos máximos ($\sigma_{\max}$). Para el Factor B, se registrarán las discontinuidades presentes y se generará un estereograma con el software DIPS para medir el ángulo (α) entre la superficie del tajeo y las discontinuidades. El Factor C se evaluará mediante la ecuación $C=8-6 \times \cos \text{Dip}$, considerando el buzamiento de cada superficie del tajeo. Se determinará el valor Q' de Barton modificado y el radio hidráulico (RH) para la estructura y el techo. Finalmente, se aplicará el método gráfico de Mathews, ubicando los valores de los factores A, B, C y Q' en el gráfico de estabilidad para identificar la estabilidad del tajeo. El método gráfico de Mathews es una herramienta poderosa para evaluar la estabilidad de las estructuras subterráneas, ya que permite integrar múltiples factores geotécnicos en un solo análisis comprensivo. La determinación precisa de los factores A, B y C, junto con la evaluación del valor Q' de Barton, proporciona una visión detallada de las condiciones geomecánicas del tajeo, permitiendo identificar áreas potencialmente inestables y tomar las medidas de mitigación necesarias.

Se definirán las propiedades del tajeo basadas en los ensayos de laboratorio, incluyendo parámetros como la cohesión, ángulo de fricción interna, tensión de compresión uniaxial, módulo de elasticidad y relación de Poisson, según el modelo de falla Mohr-Coulomb. Luego, se detallará el modelo geológico en RS2, definiendo la geometría del tajeo y asignando las propiedades del material a la malla correspondiente. Se definirán las condiciones de contorno y se ejecutará el análisis en el software RS2, calculando los esfuerzos en cada punto de la malla y comparándolos con la resistencia del material para determinar el strength factor. Los resultados se visualizarán en un mapa de colores y se interpretarán en términos de estabilidad, comparando el strength factor con el resultado del método gráfico de estabilidad de Mathews. Un número de Estabilidad (N') alto y un strength factor mayor que 1 indican que el tajeo tiene una mayor estabilidad bajo las condiciones de carga actuales. La modelación geológica en RS2 y el análisis subsiguiente son cruciales para entender el comportamiento estructural del tajeo bajo diferentes condiciones de carga. La asignación precisa de las propiedades del material y la definición de las condiciones de contorno son esenciales para obtener resultados fiables y útiles. La interpretación de los resultados en términos de

stability factor permite evaluar la seguridad y la estabilidad del tajeo, identificando áreas que pueden requerir medidas adicionales de refuerzo o estabilización.

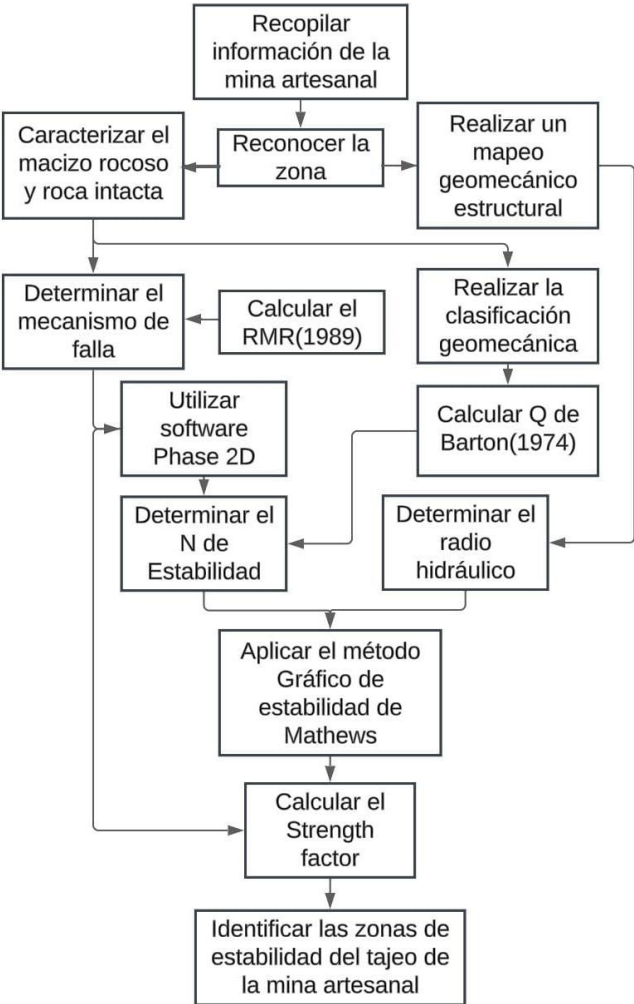


Fig. 1 Proceso de aplicación de la metodología

IV. VALIDACIÓN

A. Escenario de validación

La ubicación del proyecto minero Buena Gracia se encuentra ubicado casi en su totalidad en el Departamento de Lima, Provincia de Cañete, Distrito de Coayllo. La mina se encuentra en el cuadrante Lunahuana 26-k zona UTM 18.

B. Proceso de validación

Se realizó la evaluación geomecánica, en donde, se obtuvo el RMR 89 de 63 y se clasifica en como una roca buena y el Q de Barton es de 13.8.

El tajeo posee un ancho de 1.20 m, una altura de 9.5 m y un largo de 10 m y una inclinación de 65 grados, como se visualiza en la figura 2. Además de una profundidad de 25m.



Fig. 2 Dimensiones del tajeo

El radio hidráulico del tajeo, es el siguiente:

TABLA I
RADIO HIDRÁULICO DE TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO

Superficie	Área (m2)	Perímetro (m)	Radio Hidráulico (m)
Caja techo	95	39	2.44
Caja piso	95	39	2.44
Techo	11.4	21.4	0.53
Estructura	10.45	21.2	0.49

Se procedió a calcular el número de estabilidad (N'), para aplicar el método gráfico de estabilidad de Mathews.

Valor de Q' de Barton modificado

Se obtuvo los siguientes resultados para las diferentes superficies:

TABLA II
VALOR DE Q PARA TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO

Superficie	RQD	Jn	Jr	Ja	RQD/Jn	Jr/Ja	Q'
Caja techo	64.75	4.00	3.75	0.75	16.19	1.07	17.25
Caja piso	63.25	4.00	3.50	0.75	15.81	1.14	16.96
Techo	45.40	4.00	3.50	0.75	11.35	1.14	12.49
Estructura	27.36	4.00	3.20	0.75	6.84	1.25	8.09

Valor de esfuerzo A

Se calculó el esfuerzo vertical del tajeo. En donde:

$$\sigma_{v1} = \gamma \times z \quad (1)$$

Donde:

z: Profundidad del tajeo (m)

γ : Peso Específico (MN/m³)

σ_{v1} : Esfuerzo vertical (MPa)

Del ensayo se obtuvo un peso específico de 0.02645 MN/m³ y con la profundidad de tajeo de 25 m. Se obtuvo que:

$$\sigma_{v1} = 0.02645 \frac{MN}{m^3} \times 25m = 0.66 MPa \quad (2)$$

Para determinar el esfuerzo horizontal, se necesitó el valor de la constante 'k', el cual es el resultado del esfuerzo horizontal dividido por el esfuerzo vertical. La ecuación para el valor de 'k' es la propuesto por Sheorey, en donde:

$$k = 0.25 + 7 \times E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right) \quad (3)$$

Donde:

z: Profundidad del tajeo (m)

E_h : Modulo de young (GPa)

k: Valor de (Esfuerzo horizontal/ Esfuerzo vertical)

Se obtuvo el módulo de Young con un valor de 9.69 Gpa de los ensayos, para la ecuación se tiene el siguiente valor de k:

$$k = 0.25 + 7 \times 9.69 \left(0.001 + \frac{1}{25} \right) = 3.03 \quad (4)$$

Para calcular el esfuerzo horizontal, se usó la siguiente fórmula:

$$\sigma_{h1} = k \times \sigma_{v1} \quad (5)$$

Donde:

k: Valor de (Esfuerzo horizontal/ Esfuerzo vertical)

σ_{v1} : Esfuerzo vertical (MPa)

σ_{h1} : Esfuerzo horizontal (MPa)

$$\sigma_{h1} = 3.03 \times 0.66 = 2 \quad (6)$$

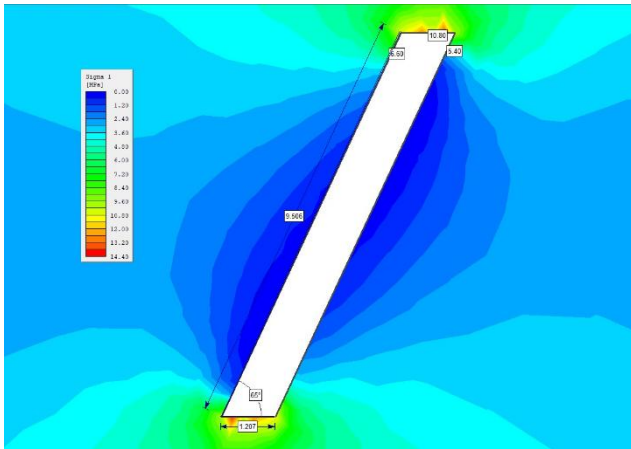


Fig. 3 Esfuerzos de compresión inducidos máximos (σ_{max}) del tajeo.

Estos esfuerzos sirven para obtener el valor de los esfuerzos de compresión inducidos máximos (σ_{max}) de las superficies del tajeo. Para lograrlo, se utilizó el software Phase 2D mediante un modelo numérico. En la figura 3 se visualiza la distribución de esfuerzos que existe alrededor del tajeo.

TABLA III
VALORES OBTENIDOS DE LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN INDUCIDOS MÁXIMOS (σ_{max}) DE TODAS LAS SUPERFICIES TAJEO

Superficie	σ_{max}
Techo	10.8
Caja techo	6.6
Caja piso	5.4
Estructura	10.8

1) Valor de factor A:

Para obtener el factor A, se procedió a determinar la resistencia uniaxial, mediante la siguiente ecuación:

$$Resistencia\ Uniaxial = \frac{UCS}{\sigma_{max}} \quad (7)$$

Donde:

σ_{max} : Esfuerzos de compresión inducidos máximos del tajeo

UCS: Ensayo de compresión simple

En donde el resultado tendrá que seguir la siguiente regla:

Si el valor de $\frac{UCS}{\sigma_{max}} = x$; $2 < x$; entonces $A = 0.1$

Si el valor de $\frac{UCS}{\sigma_{max}} = x$; $2 < x < 10$; entonces $A = 0.1125 \times \left(\frac{UCS}{\sigma_{max}} \right) - 0.125$

Si el valor de $\frac{UCS}{\sigma_{max}} = x$; $10 < x$; entonces $A = 1.0$

TABLA IV
VALOR OBTENIDO DEL FACTOR A DE TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO.

Superficie	UCS/σ_{max}	Factor A
Techo	5.55	0.50
Caja techo	9.76	0.97
Caja piso	11.94	1.00
Estructura	5.37	0.48

2) Valor de factor B:

Se midió el ángulo (α) entre la dirección de la superficie de la caja techo y piso del tajeo y la principal familia de discontinuidades, mediante el software Dips, como se visualiza en la figura 4. En donde se obtuvo 10.01 y 7.99 grados respectivamente. Para el techo y la estructura

mineralizada se ángulo de buzamiento de 60 y 60 grados respectivamente, mediante el ábaco de Potvin.

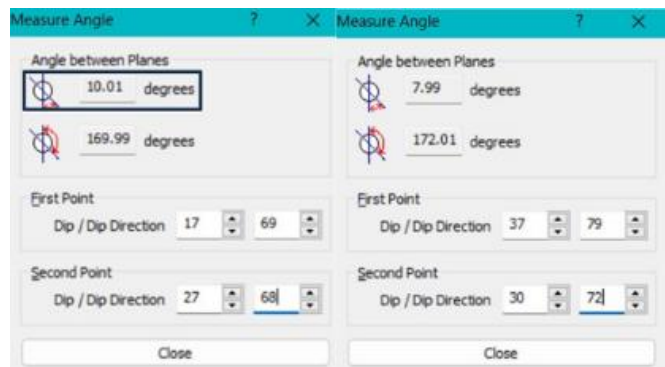


Fig. 4 Ángulo (α) entre la dirección de la superficie de la caja techo y piso del tajeo y la principal familia de discontinuidades

TABLA V
VALOR OBTENIDO DEL FACTOR A DE TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO.

Superficie	Ángulo	Factor B
Techo	60	0.80
Caja techo	10.01	0.20
Caja piso	7.99	0.22
Estructura	60	0.80

3) Valor de factor C:
Se determinó el buzamiento de cada superficie del tajeo (techo, pared, caja techo y caja piso), con el fin de evaluar la siguiente ecuación que representa el valor del factor C.

$$C = 8 - 6 \times \cos(Dip) \tag{8}$$

TABLA VI
VALOR OBTENIDO DEL FACTOR C DE TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO.

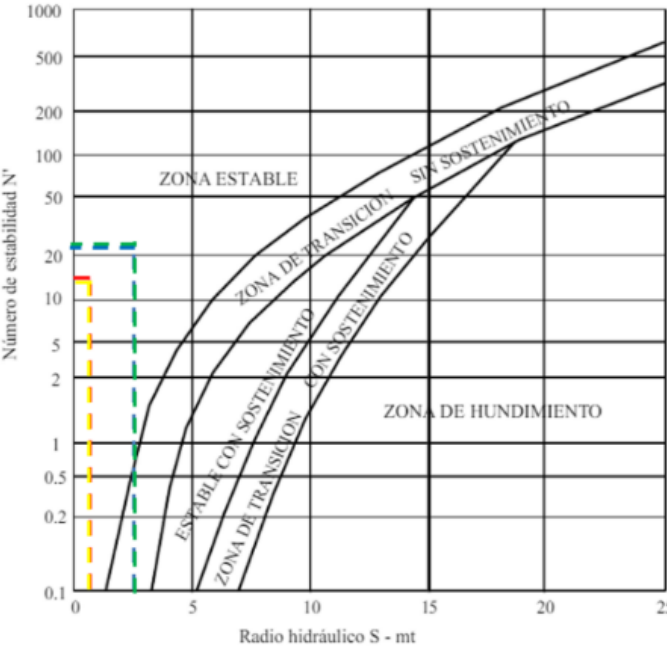
Superficie	Buzamiento	Factor C
Techo	0	2
Caja techo	66	5.50
Caja piso	68	5.67
Estructura	65	5

A. Resultado de validación
De los resultados obtenido de todos los valores de los factores, Q de Barton, se procedió a calcular el N de estabilidad.

1) Método grafico de Mathews:
Se usó el valor del número de estabilidad con su respectivo radio hidráulico para las diferentes superficies del tajeo, en para evaluar la zona de estabilidad, en donde los resultados se visualizan en la tabla 6.

TABLA VII
VALORES OBTENIDOS DEL N DE ESTABILIDAD Y RADIO HIDRÁULICO DE TODAS LAS SUPERFICIES DEL TAJEO.

Superficie	Q'	Factor A	Factor B	Factor C	N de estabilidad	RH
Techo	12.49	0.50	0.80	2	15.79	0.53
Caja techo	17.25	0.97	0.20	5.50	23.92	2.44
Caja piso	16.96	1.00	0.22	5.67	23.85	2.44
Estructura	8.09	0.48	0.80	5	14.37	0.49



Superficie	Ubicación
Techo	Red
Caja techo	Green
Caja piso	Blue
Estructura	Yellow

Fig. 5 Aplicación del método grafico de Mathews para todas las superficies del tajeo.

Se determinó que para todas las superficies se encuentran dentro de la zona estable, mediante la aplicación del método gráfico de estabilidad de Mathews.

TABLA VIII
VALORES OBTENIDOS POR SUPERFICIE DEL MÉTODO GRAFICO DE ESTABILIDAD DE MATHEWS DEL TAJEO

Superficie	Mathews
Techo	Zona estable
Caja techo	Zona estable
Caja piso	Zona estable
Estructura	Zona estable

2) Strength factor:

Se realizó mediante el software Phase 2D, como se visualiza en la figura 6, en donde se aplicó el método numérico de elementos finitos, para el cual se obtuvo un valor de 1.57 para el techo, mientras que tanto la caja techo como piso se obtuvo un valor de 1.3. Sin embargo, había zonas en donde el strength factor aumentaba hasta 1.45.

Lo cual evidencia, los resultados obtenidos por el método gráfico, ya que al tener un strength factor mayor que 1 indica que el esfuerzo inducido es menor que la resistencia de la roca, lo cual genera que sea una zona estable.

Asimismo, se comparó los resultados obtenidos mediante el método gráfico de estabilidad de Mathews, con los resultados obtenidos por el strength factor, lo cual se evidencia una correlación, ya que se obtuvo zona estable para todas las superficies del tajeo y strength factor superiores a 1, lo cual indica que los esfuerzos son menores a la resistencia de la roca.

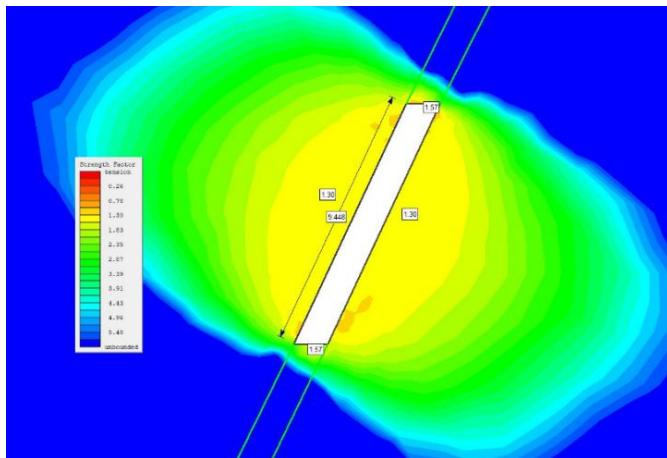


Fig. 6 Strength factor del tajeo

TABLA XI
COMPARACIÓN DE VALORES OBTENIDOS DEL MÉTODO GRÁFICO DE ESTABILIDAD DE MATHEWS Y EL STRENGTH FACTOR DEL TAJEO

Superficie	Mathews	Strength factor
Techo	Zona estable	1.57
Caja techo	Zona estable	1.30
Caja piso	Zona estable	1.30
Estructura	Zona estable	1.57

V. CONCLUSIONES

El método gráfico de Mathews permitió identificar la zona de estabilidad de los tajeos, de forma rápida y sencilla. De igual para corroborar los resultados se usó modelos numéricos, para la evaluación del strength factor como el factor A.

Se obtuvo para todas las superficies del tajeo una zona estable, porque el radio hidráulico del tajeo es valor bajo estando en el rango del 0 a 3, por lo que para obtenerse como resultado de zona de transición sin sostenimiento es necesario reducir el número de estabilidad. El Q de Barton modificado obtuvo un valor alto, ya que el RQD obtenido para las diversas superficies indica que es una roca tipo buena, que junto con los valores de los diversos factores sumados es imposible obtener números de estabilidad en un rango de 1 a 5.

El strength factor, a pesar de que no calcula la zona estable del tajeo de forma directa, indirectamente te da un análisis de cómo se encuentra los esfuerzos máximos inducidos de él. Por lo que te permite generar correlaciones mediante los resultados del método gráfico de Mathews y este mismo.

Para una mina artesanal, obtener todos estos resultados geomecánicos, brinda un apoyo en la seguridad, y permite generar nuevos análisis variando el radio hidráulico, para posibles ampliaciones del tajeo con la metodología propuesta.

REFERENCIAS

- [1] Abdellah, W. R. E., Hefni, M. A., y Ahmed, H. M. (2020). Factors Influencing Stope Hanging Wall Stability and Ore Dilution in Narrow-Vein Deposits: Part 1. Geotechnical and Geological Engineering, 38(2), 1451–1470. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01102-w>
- [2] Adoko, A. C., Vallejos, J., y Trueman, R. (2020). Stability assessment of underground mine stopes subjected to stress relaxation. Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 129(1), 30–39. <https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1721995>
- [3] Belizario, M., Condori, R. (2021). Aplicación del Método Gráfico de Estabilidad de Mathews en vetas angostas para determinar la dimensión geométrica óptima del tajeo N°1 y controlar su inestabilidad en la U.M. Debra Luz [Tesis para título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/659079>
- [4] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons. <https://tinyurl.com/2bejxae>
- [5] Calderon, L. J., & Guerrero, J. W. (2021). Aplicación de la geomecánica en el método de explotación por corte y relleno ascendente para el control de dilución en mina Coricancha, San Mateo 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/28292>
- [6] Cui, X., Yang, S., Zhang, N. y Zhang, J. (2024). Optimization of stope structure parameters by combining Mathews stability chart method with numerical analysis in Halazi iron mine. Heliyon, Volume 10, 4. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26045>
- [7] Delentas, A., Benardos, A., y Nomikos, P. (2021). Analyzing stability conditions and ore dilution in open stope mining. Minerals, 11(12). <https://doi.org/10.3390/min11121404>
- [8] Díaz L, Vallejos J, Castro C (2018) Revisión de métodos de estimación de sobre-excavación para caserones abiertos. In: Congreso iberoamericano en minería subterránea y a cielo abierto UMining. Santiago.
- [9] Goodman, R. E. (1989). Introduction to rock mechanics (2nd ed.). Wiley.
- [10] Hoek E, Diederichs MS (2006) Empirical estimation of rock mass modulus. Int J Rock Mech Min Sci 43:203–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- [11] Jia, H., Guan, K., Zhu, W., Liu, H., y Liu, X. (2020). Modification of rock stress factor in the stability graph method: a case study at the Alhada Lead-Zinc Mine in Inner Mongolia, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(6), 3257–3269. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01753-7>
- [12] Kang, Z., Qing, W., Qiang, L., Yajing, Y., Xiang, Y., Junqiang, W., y Shuai, C. (2019). Optimization calculation of stope structure parameters based on mathews stabilization graph method. Journal of

- Vibroengineering, 21(4), 1227–1239. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20639>
- [13] Kayabasi, A., N. Yesiloglu-Gultekin, N. y Gokceoglu, C. (2015) Use of non-linear prediction tools to assess rock mass permeability using various discontinuity parameters. *Engineering Geology*, 185, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.007>
- [14] Khazhyylai, Ch., Kosyrev, M., Eremenko, V., y Umarov, A. (2021). Stope stability assessment by the Mathews–Potvin method: a case-study of open stoping in salt rock mass under conditions of secondary stress field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 684(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012011>
- [15] Madenova, Y., y Suorineni, F. T. (2020). On the question of original versus modified stability graph factors—a critical evaluation. *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 129(1), 40–52. <https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1721996>
- [16] Mathews KE, Hoek E, Wyllie DC, Stewart SB (1981) Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 meters in hard rock. CANMET, Dublin
- [17] Mawdesley, C., Trueman, R., y Whiten, W. J. (2001). Extending the Mathews stability graph for open–stope design. *Mining Technology*, 110(1), 27-39. <https://doi.org/10.1179/mnt.2001.110.1.27>
- [18] Ministerio de Energía y Minas. Fax Coyuntural de Accidentes Mortales - Año 2022. https://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12464
- [19] Mortazavi, A., y Ossebay, B. (2022). The Consolidated Mathews Stability Graph for Open Stope Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(5), 2409–2424. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-02034-0>
- [20] Osinergmin. (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf
- [21] Pagé, P., Yang, P., Li, L., y Simon, R. (2021). A semi-empirical solution for estimating the elastic stresses around inclined mine stopes for the Mathews-Potvin stability analysis. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 405–414. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/690/2021>
- [22] Pino, J., Gómez, R., Marambio, E., Miranda, R., Delonca, A., y Suzuki, K. (2023). Three-dimensional Effect of Stresses on Inclined Open Stope Mine Design. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03298-z>
- [23] Potvin Y. 1988. Empirical open stope design in Canada [PhD Thesis]. University of British Columbia, Vancouver. Presidencia de la República. (2017). Decreto Supremo N° 024-2016-EM de 2016. Por lo cual se expide D.S. N° 023-2017-EM que modifica artículos de su antecesor. https://minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2016/RSSO_2017.pdf
- [24] Salgado-Medina, L., Núñez-Ramírez, D., Pehovaz-Alvarez, H., Raymundo, C., & Moguerza, J. M. (2019). Model for dilution control applying empirical methods in narrow vein mine deposits in Peru. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 971). https://doi.org/10.1007/978-3-030-20494-5_41
- [25] Sepehri, M., Apel, D., y Liu, W. (2017). Stope Stability Assessment and Effect of Horizontal to Vertical Stress Ratio on the Yielding and Relaxation Zones Around Underground Open Stopes Using Empirical and Finite Element Methods. *Archives of Mining Sciences*, 62(3), 653–669. <https://doi.org/10.1515/amsc-2017-0047>
- [26] Szmigiel, A., y Apel, D. B. (2022). Predicting the Stability of Open Stopes Using Machine Learning. *Journal of Sustainable Mining*, 21(3). <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1369>
- [27] Trueman R., Mikula P., Mawdesley C., Hares N., 2000., Experience in Australia with the application of the Mathews method of open stope design. *CIM Bull.* 93. 162-167.
- [28] Vallejos, J. A., & Díaz, L. (2020). A New Criterion for Numerical Modelling of Hangingwall Overbreak in Open Stopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(10), 4559–4581. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02179-z>
- [29] Zhang, L., Hu, J.-H., Wang, X.-L., y Zhao, L. (2018). Optimization of Stope Structural Parameters Based on Mathews Stability Graph Probability Model. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1754328>
- [30] Zhao, X., & Zhou, X. (2023). Design Method and Application of Stope Structure Parameters in Deep Metal Mines Based on an Improved Stability Graph. *Minerals*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/min13010002>