




Application of Thermal Soil Freezing for Temporary Self-Support in Mining Tunnel Construction Across Saturated, Sandy, Clayey, and Silty Rock Formations




Fernando R. Sumiri-Mantilla, Student.¹, Rosmary Guillén-Guillén, MSc.², Juan F. Retamozo-Belsuzarri, Ing.³
¹⁻³Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa-Perú, u17213001@utp.edu.pe, rosmaryegui@gamil.com, c18783@utp.edu.pe

Abstract– The present study encompassed the application of the thermal method of artificial ground freezing in sandy, clayey, and silty soils for temporary self-support in mining tunnels. A numerical thermo-hydrogeological simulation was conducted using the Plank cooling equation and thermodynamic principles. It was determined that clays require twice the amount of heat extraction compared to sand to reach the optimal temperature, demonstrating an inverse relationship between saturation percentage and freezing time. By considering three refrigerants, it was found that liquid nitrogen is capable of freezing 77% faster than brines. The self-support time of a rock mass was calculated and compared before and after applying the method, showing that artificial freezing enables the creation of temporary self-support in mining tunnels with a roof width exceeding 3.8 meters, with an estimated duration of less than 12 years; where for narrower roof widths, no additional reinforcement is required.

Keywords– Artificial ground freezing, thermal method, mining tunnels, self-support time, numerical simulation.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Aplicación de la Congelación Térmica del Suelo para el AutosopORTE Temporal en la Construcción de Túneles Mineros en Formaciones Rocosas Saturadas, Arenosas, Arcillosas y Limosas

Fernando R. Sumiri-Mantilla, Student.¹, Rosmary Guillén-Guillén, MSc.², Juan F. Retamozo-Belsuzarri, Ing.³
¹⁻³Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa-Perú, u17213001@utp.edu.pe, rosmariegui@gamil.com, c18783@utp.edu.pe

Resumen– El presente trabajo abarcó la aplicación del método térmico de congelamiento artificial en suelos arenosos, arcillosos y limosos para el autosopORTE temporal de túneles mineros. Se aplicó una simulación numérica termo-hidrogeológica empleando la ecuación de enfriamiento de Plank y los principios de la termodinámica. Se determinó que las arcillas requieren una sustracción del doble de la cantidad de calor respecto a la arena hasta alcanzar la temperatura óptima, evidenciando la relación inversa del porcentaje de saturación y tiempo de congelamiento. Mediante la consideración de tres medios refrigerantes, se determinó que el nitrógeno líquido es capaz de congelar un 77% más rápido que las salmueras. Se calculó y comparó el tiempo de autosopORTE de un macizo rocoso antes y una vez aplicado dicho método, demostrando que el congelamiento artificial permite la creación de un soporte temporal autoportante en túneles mineros con un ancho de techo superior a 3.8 metros con una duración estimada de menos de 12 años; donde para anchos de techo inferiores, no se requiere un refuerzo adicional.

Palabras clave - Congelamiento artificial del suelo, método térmico, túneles mineros, tiempo de autosopORTE, simulación numérica.

I. INTRODUCCIÓN

Al realizar las labores de sostenimiento en la construcción de túneles mineros, el tiempo de autosopORTE es crucial, ya que determina el tiempo límite necesario para sostener una labor de manera artificial antes del colapso. Al plantear escenarios con una capacidad portante mínima y con presencia de saturación, el tiempo de autosopORTE se ve muy reducido, implicando un colapso casi inmediato.

El congelamiento artificial de suelos, popularizado en Inglaterra en el siglo XIX, aprovecha los factores negativos de capacidad portante de los suelos saturados, haciendo que el agua contenida en esta, al entrar en estado de fusión, les brinde a los suelos la rigidez necesaria para permitir las labores de excavación de manera segura, en condiciones óptimas de avance y con un bajo empleo de energía.

Congelar los suelos de manera artificial, tiene múltiples aplicaciones en la ingeniería; desde la preservación del muestreo de testigos diamantinos, hasta el tratamiento de suelos con fines agrícolas. La utilización de los suelos congelados en las operaciones mineras está directamente asociada a la

resistencia mecánica a la deformación, ya que se ha evidenciado que estos pueden tolerar altos esfuerzos de compresión [1].

Aplicar el congelamiento artificial de suelos, implica la perforación de orificios cilíndricos, donde se introducen tubos de alta conductividad térmica que transportaran el fluido refrigerante cíclicamente mediante un circuito cerrado o abierto. La elección del fluido refrigerante; salmueras, CO_2 y N_2 , es crucial porque determina el tiempo de creación de la pared congela necesaria para dimensionar el tiempo de congelamiento efectivo.

Desde el punto de vista de la física, sustraer el calor de una porción de suelo, compete a ramas como la termodinámica, calorimetría, geofísica y geotérmica, que si bien es cierto son fundamentales para comprender los fenómenos relacionados a la transferencia de calor en matrices rocosas, estos al ser sometidos a diversos factores ligados a las propiedades anisotrópicas de los suelos; varían de manera compleja aumentando la dispersión de los valores obtenidos mediante el muestreo.

Ahora bien, las propiedades de conducción térmica de los suelos varían a razón del coeficiente de transferencia de calor propios de cada suelo. Las familias de suelos más abundantes en los entornos adyacentes a las zonas mineralizadas o al remover la primera capa de suelo, son las arcillas, los limos y las arenas. Al tomar esos tipos de suelo de manera isotrópica, permiten el cálculo y simulación numérica en entornos variables de saturación y tipo de medio refrigerante.

En el mismo sentido, la simulación numérica aplicada en el congelamiento artificial de suelos constituye un método eficaz para predecir los tiempos efectivos de congelamiento y simular entornos favorables y desfavorables mediante la manipulación de variables dependientes, donde a través del empirismo y la validación experimental, se pueden obtener resultados cercanos a pruebas en situ que contribuyan al diseño y la implementación óptima de este proceso en diferentes contextos geológicos y ambientales.

En este trabajo de investigación, se simuló numéricamente los tiempos de congelación efectivos y óptimos de los suelos limosos arcillosos, limosos y arcillosos aplicando la ecuación de enfriamiento de Plank [2]. Se estimó la variabilidad del tiempo de congelación efectiva considerando el porcentaje de saturación, longitud de pared congelada y tipo de

medio refrigerante. Se elaboró una malla de perforación para tubos de fluido refrigerante y se estimó el tiempo de autosoprote de la estructura congelada en función del ancho del túnel.

II. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para construir un modelo matemático que simule la transferencia del calor en un medio ideal isotrópico, se evaluó la influencia de las ecuaciones gobernantes de la termodinámica en un entorno bidimensional. Con la ecuación de enfriamiento de Plank, se midió el tiempo de duración del proceso de congelación de un cuerpo con contenido porcentual de agua. Se precisó de variables que hacen referencia la calorimetría, donde el cuerpo congelado, rodeado de materia, alcanza temperaturas bajo cero o iguales al medio congelante,

Se segmentaron los volúmenes empíricos del macizo rocoso de manera cilíndrica en función a la forma de los tubos donde circula el fluido refrigerante. Se considero un ajuste del factor de contacto del tubo de fluido refrigerante con el área cilíndrica que constituye la segmentación del macizo rocoso.

Se consideró la influencia de la gradiente geotérmica de la tierra en el tiempo de congelamiento efectivo, además, influyeron en el cálculo, la cantidad de calor absorbido o liberado por el cambio de fase, tomando en cuenta el punto de fusión del agua en porcentajes variables de saturación.

Para estimar un valor numérico que prediga el tiempo de colapso de un túnel minero, se empleó el criterio Bieniawski y el Sistema de Clasificación Geomecánica (GSI), ampliamente reconocidos en la ingeniería geotécnica por su uso común, estos enfoques se utilizan para evaluar la estabilidad de las excavaciones subterráneas. Se basan en la consideración de varios factores geológicos y geotécnicos con el fin de calcular la capacidad de carga del terreno y anticipar cómo se comportará frente a distintas cargas y condiciones particulares.

Dado que la entalpia es un fenómeno ligado a las propiedades del medio conductor y, además, considerando que las propiedades mecánicas del del macizo rocoso son diferentes en cada punto de su volumen, se estimaron valores empíricos que permitirán simular la congelación artificial en un entorno favorable e isotrópico, para ello se empleó:

Ecuación de Plank

$$t_f = \frac{\rho\lambda}{(T_f - T_i)} \left[\frac{Ra^2}{k} + \frac{Pa}{h} \right] \quad (1)$$

Calor latente de fusión

$$Q_f = m * l_f \quad (2)$$

Calor latente de fusión para cuerpos saturados

$$\lambda_{Cuerpo} = \lambda_{Agua} * \%H_2O \quad (3)$$

Calor específico de un Cuerpo

$$C_e = \frac{Q}{m(T_f - T_i)} \quad (4)$$

Módulo de deformación del macizo rocoso

$$E_{rm} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * \sqrt{\frac{\sigma_{cl}}{100}} * 10^{\frac{GSI+10}{40}} \quad (5)$$

Índice de Resistencia Geológica

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (6)$$

Índice de calidad de macizo rocoso

$$E_{rm} = 2 * RMR - 100 \quad (7)$$

A. Características térmicas de los medios congelantes

Se consideraron tres medios congelantes: las salmueras, el anhídrido carbónico y el nitrógeno líquido, como se detalla en la Tabla I. [3], [4], [5]. Las salmueras industrialmente representan un congelante conveniente y eficaz método de congelar suelos, operando en circuitos cerrados y con bajos costes. Esta alcanza un espesor de pared óptimo en periodos prolongados de tiempo comprendido entre 15-36 días, considerando las condiciones del material a congelar, esta se suministra a -25 °C, teniendo una pérdida de 2 °C de temperatura debido a la exposición de las tuberías al entorno.

El segundo medio congelante utilizado fue el anhídrido carbónico, este medio congelante opera de manera mixta; en circuitos cerrados y abiertos, este es suministrado a temperaturas cercanas a los -50 °C sin llegar a temperaturas inferiores a los -56.6 °C dado que su punto de solidificación podría entorpecer y dañar el sistema de congelación.

El tercer medio congelante utilizado fue el nitrógeno líquido, este se encuentra generalmente a una temperatura de -200 °C; sin embargo, se suministrará a temperaturas de -180 °C a -60 °C en circuitos abiertos.

TABLA I.
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS CONGELANTES

Medio refrigerante	Tipo de circuito	Temperatura de aplicación	Temperatura en el taladro congelado
NaCl	Cerrado	-25 °C	-23 °C
CO2	Mixto	-50 °C	-48 °C
N2	Abierto	-180 °C	-178 °C

B. Propiedades térmicas de los suelos arcillosos, limosos y arenosos

Para representar las propiedades de las arcillas, se tomaron en cuenta los cuatro tipos de arcillas: la caolinita, la illita, la esmectita y la vermiculita. En el presente trabajo, se consideró la caolinita según la Tabla II. [6], [7], por ser los que

generalmente encontramos en naturaleza y primeras capas de suelo. En el caso de los suelos limosos, debido a su composición, el calor específico presentará múltiples variaciones debido a la condición anisotrópica de los macizos rocosos. Por lo tanto, se consideró un intervalo máximo y mínimo según la investigación realizada. Para los suelos arenosos, de igual manera, se llevó a cabo una recopilación de los valores referidos al Calor Específico (C_e), la Densidad (ρ), el Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor (h) y la Conductividad Térmica (k).

TABLA II
PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS ARENOSO, LIMOSOS Y ARCILLOSOS

Tipo de suelos	$C_e \left(\frac{cal}{g^{\circ}C}\right)$	$\rho \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	$h \left(\frac{W}{m^2^{\circ}C}\right)$	$k \left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$
Arcillas	0.578	2400	85	1.09
Limos	0.325	2200	85	1.22
Arenas	0.9984	2500	85	2.07

C. Propiedades geomecánicas de los suelos arcillosos, limosos y arenosos

Los limos, arcillas y arenas saturadas en estado natural, al tener estructuras pobres y saturadas según la relación GSI, se considera que no presentan un RQD, permitiendo según Lambe [8] tolerar cargas inferiores a 1 MPa. Por otro lado, los mismos suelos según Liu [8], al encontrarse congelados artificialmente, estos son capaces de tolerar cargas superiores a los 38.48 MPa.

D. Espesor de pared congelada requerida en los hastiales

Se requiere de una proporción media de 0.3 veces la longitud de las zapatas de una labor para operar de manera óptima. Por otro lado, teniendo en cuenta que los taladros de fluido congelante tienen forma cilíndrica, el espesor de la pared congelada y el volumen unitario por taladro estarán directamente relacionados a la dimensión del túnel vistos en la Tabla III. [9].

TABLA III.
ANCHO DE PARED CONGELADA REQUERIDA POR DIMENSIÓN DEL TÚNEL

Dimensión del túnel (m)	Espesor de pared congelada por taladro unitario (m)	Volumen unitario congelado por taladro (m^3)
Labor 3.5x3.5	1.05	7.42
Labor 4x4	1.2	8.48
Labor 4.5x4.5	1.35	9.54
Labor 5x5	1.5	10.60
Labor 5.5x5.5	1.65	11.66
Labor 6x6	1.8	12.72

E. Superficie del tubo congelado, bloque congelado y factor de corrección de área de contacto.

Dado que la ecuación de Plank considera al entorno exterior como el área de contacto con el cuerpo a enfriar, al

emplear un tubo con fluido refrigerante dentro del macizo rocoso, el área de contacto con el cuerpo cilíndrico a congelar cambia, por ello, se tomó la fracción del área que representaría en el exterior. Utilizando la Tabla IV., podemos dimensionar las medidas de la estructura congelada y el factor de corrección, además de la superficie refrigerante y la del volumen cilindro a congelar. En tal sentido para la corrección del área de contacto tendremos:

$$F_c = \frac{A_b}{S_t} \quad (8)$$

Donde:

F_c = Factor de corrección de área de contacto

A_b = Área total del cilindro a congelar

S_t = Superficie del taladro

TABLA IV.
FACTOR DE CORRECCIÓN DE ÁREA DE CONTACTO EN TUBOS CONGELADOS

Superficie del tubo congelado		Superficie del bloque congelado	
Diámetro	0.146 m	Espesor de bloque congelado deseado	1.05 m
Altura	15 m	Longitud del bloque deseado	15 m
Área lateral	6.88 m^2	Área lateral	1.10 m^2
Área de la base	0.02 m^2	Área de la base	15.75 m^2
Superficie total	6.90 m^2	Área total	16.85 m^2
Factor de corrección			2.44

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comparó el tiempo de congelamiento efectivo bajo diversas variables de porcentajes de agua para analizar su influencia en la creación de la pared congelada óptima. Como se puede apreciar en la Figura 1. Figura 2. Y Figura 3., la tendencia del tiempo efectivo de congelación es inversamente proporcional a la conductividad térmica propia de cada compuesto heterogéneo. Las arcillas presentaron el mayor tiempo de congelación en días debido a su alta conductividad térmica y, por ende, menor coeficiente de transferencia de calor. Por otro lado, las arenas, con una menor conductividad térmica y un coeficiente de transferencia de calor más alto, exhibieron el menor tiempo de congelación. En cuanto a los limos, con propiedades intermedias en términos de conductividad térmica y coeficiente de transferencia de calor, su tiempo de congelación también se sitúa en un punto intermedio.

En el mismo sentido, El calor latente del agua, que se define como la cantidad de energía necesaria para cambiar la fase de una unidad de masa de agua a una temperatura constante, desempeña un papel crucial en el proceso de congelación, ya que al estar en presencia del terreno circundante se ve alterada, pudiendo influir negativamente este cambio alargando el proceso de congelación. Durante el proceso de congelación, ocurre un cambio de estado donde el agua libera el calor latente presente en ella al entorno en un periodo donde la temperatura se mantiene constante y la energía solo modifica el estado de la materia.

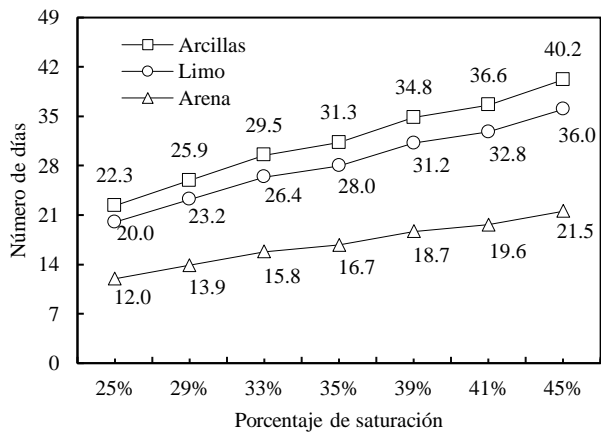


Fig. 1 Tiempo de congelamiento efectivo para arcillas, limos y arena empleando salmueras

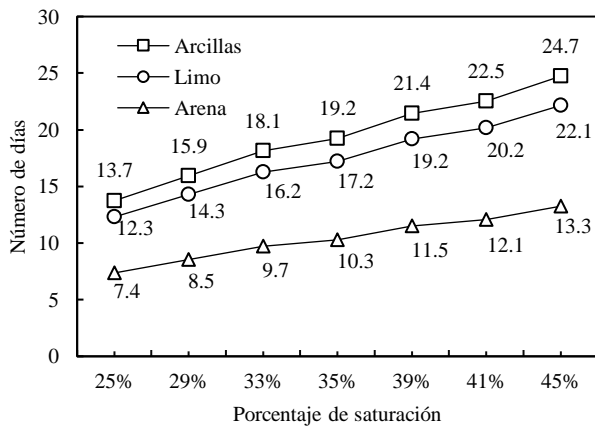


Fig. 2 Tiempo de congelamiento efectivo para arcillas, limos y arena empleando CO2

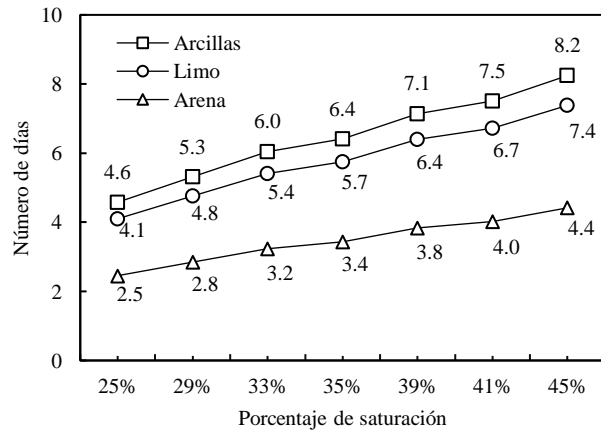


Fig. 3 Tiempo de congelamiento efectivo para arcillas, limos y arena empleando N2

A continuación, se muestra el efecto del empleo de los diferentes medios refrigerantes en función del tiempo de congelamiento efectivo. Se consideró la pérdida de temperatura en las tuberías, teniendo en cuenta que la temperatura de aplicación de las salmueras, el anhídrido carbónico y el

nitrógeno líquido es de $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. En la Figura 4, podemos evidenciar la variación del tiempo medio de congelamiento efectivo en días con respecto a los tres medios refrigerantes empleados en la simulación.

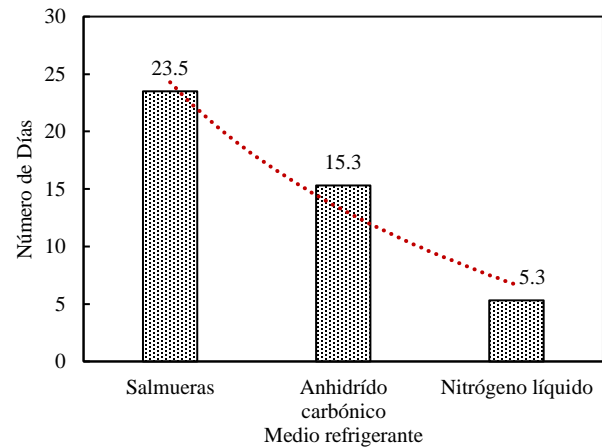


Fig. 4 Tiempo medio de congelamiento en función al tipo de medio refrigerante

Considerando el tiempo que tarda en congelarse un bloque saturado, es indispensable que el ancho de la pared tenga una temperatura inferior a los $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por este motivo, es importante tener en cuenta la variación de la temperatura con respecto al centro del taladro. En este sentido, es necesario asegurarse de que el espesor de la pared congelada no sea inferior a lo establecido en la Tabla III. Por lo tanto, al aplicar la propiedad del calor entregado y el calor necesario para la fusión del hielo, representado en la Figura 5, se puede notar la tendencia del entorno a equilibrar la temperatura

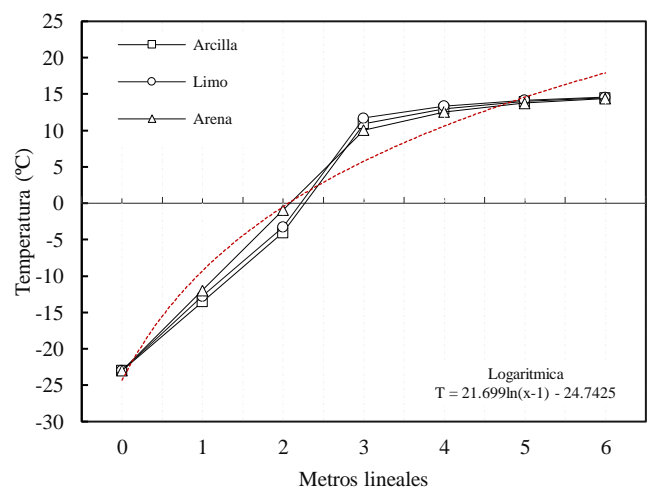


Fig. 5 Variación de la temperatura lineal respecto al radio del tubo del fluido congelante

Como se muestra en el gráfico, se presentan tres series similares, de las cuales se tomó la tendencia logarítmica para

los limos. Esta tendencia considera la temperatura en grados Celsius $T_{\circ c}$ y la distancia en metros desde el centro del taladro de fluido congelante y la exención del macizo rocoso; está estará descrita por la siguiente ecuación:

$$T_{\circ c} = 21.699 * \ln(x_m + 1) - 24.7425 \quad (9)$$

Dado que la temperatura centígrada ($T_{\circ c}$) y la distancia en metros x_m desde el centro del taladro de fluido congelante, se halló la cantidad de metros congelados a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos, arrojando un valor de 0.5668 m. Ahora bien, el radio será el equivalente a la mitad del espaciamiento y este estará en una relación de 2 a 3 respecto al lateral, ver Figura 6.

Tener en cuenta la pérdida de calor gradual dada por el entorno circundante y empleando una disposición de los taladros optima, garantiza una cobertura efectiva de la zona a congelar, asegurando que se alcance la temperatura deseada en cada punto crítico del macizo rocoso. La relación específica entre el radio y el espaciamiento lateral proporciona una distribución óptima de la congelación, maximizando así la eficacia del proceso y garantizando la integridad estructural de la pared congelada.

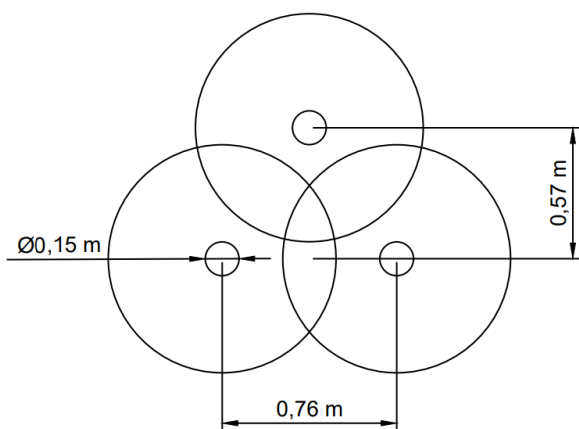


Fig. 6 Espaciamiento del taladro de fluido congelante.

Por cada fila en los hastiales, se tendrán dos filas en el techo y tres en las zapatas en función a la relación de metros congelados por taladro, para ello, se tuvo en cuenta el espesor óptimo de pared congelada visto en la Tabla IV. Ahora bien, se considerará la temperatura de fusión de las arcillas saturadas, siendo de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ para los criterios de pared congelada donde se tendrá la cantidad de metros de pared congelada inferior a los $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Teniendo calculado el burden y espaciamiento mostrado en la Figura 6, se dispondrá de la hilera de taladros que deberán respetar estos lineamientos, donde de acuerdo con el criterio de Yang [10], la distribución de taladros obedecerá a la forma de la geometría del túnel visto en la Figura 7. Considerar una temperatura inferior a los $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, garantiza una distribución óptima de los taladros para maximizar la eficiencia de congelación, mantener la pared congelada durante un tiempo medio para que se implementen el sostenimiento definitivo, en

tal sentido, se asegura una formación de hielo uniforme y robusta en la estructura subterránea.

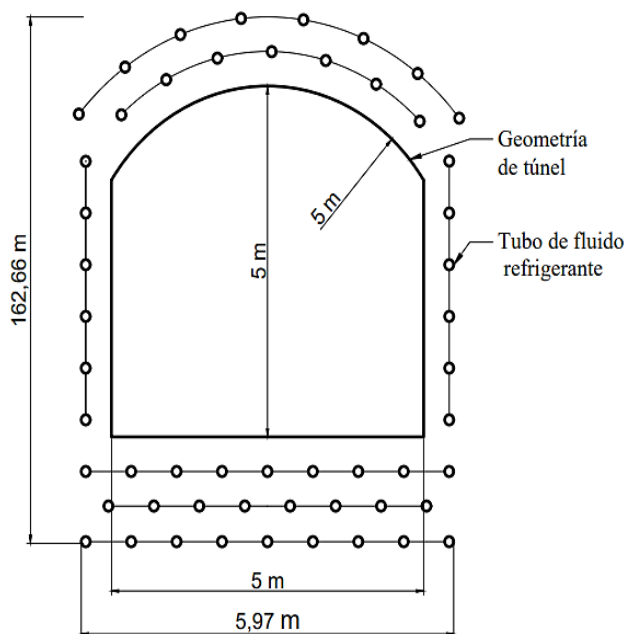


Fig. 7 Malla de tubos de fluido congelante

Teniendo en cuenta que un macizo rocoso arcilloso, limoso y arenoso, carecen de bloques y planos que indiquen esquistosidad, según indica de resistencia geológica de una roca (GSI) establecido por Hoek y Marinos [11], estos recibirán una puntuación de 10, donde para medir su tiempo de autoapoye en túneles prescindiremos de la correlación RMR_{89} y GSI, donde al emplear las ecuaciones (6) y (5) y considerar el criterio (D) de grado de alteración igual a 1 y un GSI de 80 teniendo en cuenta que estos cuerpos al congelarse ganan uniformidad y se comportan como un sólido, tendremos un RMR con un valor igual a 77.

Es crucial tener en cuenta que, al congelarse, estos cuerpos rocosos adquieren una mayor uniformidad y comportamiento sólido, lo que influye significativamente en su estabilidad y tiempo de autoapoye en contextos de ingeniería subterránea.

La expansión del agua al congelarse es un proceso fundamental para comprender la estabilidad de los macizos rocosos. Cuando el agua se transforma en hielo, experimenta un aumento en su volumen, lo que puede ejercer presiones internas considerablemente altas dentro de las fisuras y porosidades de las formaciones rocosas. En macizos compuestos por arcilla, limo y arena, esta expansión no solo fortalece el suelo congelado, sino que también juega un papel crucial en la preparación de terreno para futuras excavaciones. Es importante destacar que esta propiedad del agua congelada no solo influye en la estabilidad inmediata del macizo rocoso, sino que también elimina el efecto del agua líquida en el sostenimiento temporal y definitivo del túnel.

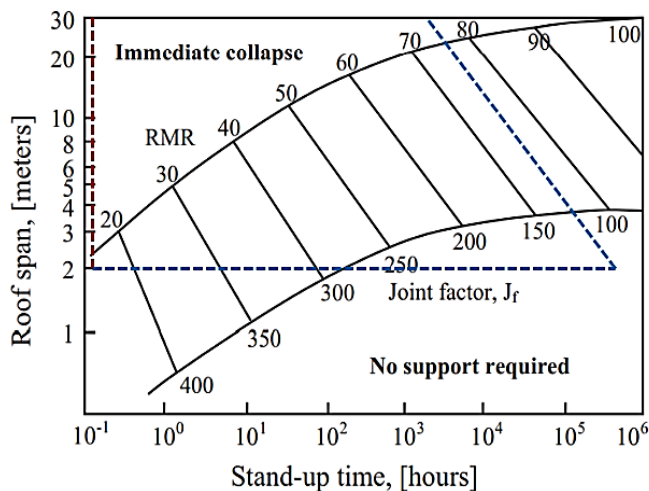


Fig. 8 Tiempo de autoaporte del suelo congelado, mediante el sistema de clasificación RMR.

En la Figura 8. [12], se indicó mediante una línea roja los suelos saturados en estado y temperatura en condiciones naturales normales, donde se muestra que, para los túneles con una luz libre de techo inferior a los 2 m, el tiempo de autoaporte es menor a 15 minutos, mientras que para los túneles con una luz libre de techo superior a los 2 m, el colapso es inmediato. Por otro lado, con una línea azul, se señaló los suelos congelados artificialmente, dichos suelos presentan un tiempo de autoaporte indeterminado para túneles de 3x3 m, mientras que para galerías superiores a la configuración 4x4 m el tiempo de autoaporte esta será de 10 años, reduciéndose a medida que aumenta el tamaño del túnel.

IV. CONCLUSIONES

Mediante la modelización numérica, se pudo demostrar que la conductividad térmica desempeña un papel crucial en el tiempo de congelamiento efectivo, mostrando una relación inversamente proporcional con el tiempo de formación de la pared congelada. Se ha evidenciado que, a menor conductividad térmica, el tiempo de congelación es mayor. Por ejemplo, las arcillas saturadas tardaron un 11% más en congelarse en comparación con los limos, y estos últimos un 40% más que las arenas.

El porcentaje de saturación influye en el tiempo de formación de la pared congelada, ya que el agua, al igual que cualquier líquido, requiere una cantidad adicional de energía para cambiar de estado. Por lo tanto, cuanto más saturada esté la roca, mayor será su tiempo de congelamiento, lo que puede significar aumentos de hasta el doble de tiempo en días cuando comparamos porcentajes de saturación del 25% al 45%.

La elección del medio refrigerante también afecta a la formación de la pared congelada. Se observó una diferencia del 34.8% en el tiempo efectivo de congelamiento entre las salmueras y el anhídrido carbónico, y del 77.39% en el caso del nitrógeno líquido.

La variación de la temperatura en función de la distancia desde el taladro congelado se describe mediante una ecuación

logarítmica que relaciona la distancia en metros y la temperatura en grados centígrados. Esto permite calcular la distancia necesaria para alcanzar temperaturas inferiores a los -15°C, lo cual es útil para determinar el espaciamiento de los taladros en una malla de perforación.

La aplicación del congelamiento artificial permite crear un autoaporte temporal con una estimación de tiempo menor a los 12 años para túneles mineros con una luz de techo superior a los 3.8m, siendo que para valores menores no se requiere un sostenimiento adicional.

REFERENCIAS

- [1] D. Y. Wang, W. Ma, X. X. Chang, and A. G. Wang, "Study on the resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 42, no. 3, pp. 194–200, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2005.01.006.
- [2] M. López-Leiva and B. Hallström, "The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions," *J Food Eng*, vol. 58, no. 3, pp. 267–275, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0260-8774(02)00385-0.
- [3] G. A. Maykut and B. Light, "Refractive-index measurements in freezing sea-ice and sodium chloride brines," *Applied Optics*, Vol. 34, Issue 6, pp. 950-961, vol. 34, no. 6, pp. 950–961, Feb. 1995, doi: 10.1364/AO.34.000950.
- [4] M. A. Alzoubi, A. P. Sasmito, A. Madiseh, and F. P. Hassani, "Intermittent Freezing Concept for Energy Saving in Artificial Ground Freezing Systems," in *Energy Procedia*, 2017. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.297.
- [5] N. R. Dolce, "Aplicación de la técnica Encapsulación-Deshidratación para la crioconservación de ápices de Citrus sinensis", Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267198102>
- [6] U. DE La República and I. L. Agr Rucks Ing Agr F García Ing Agr A Kaplán Ing Agr J Ponce de León Ing Agr M Hill, "FACULTAD DE AGRONOMÍA Propiedades Físicas del Suelo," 2004.
- [7] G. Sarche, X. Alejandro, J. Villacís, and A. Alejandro, "Caracterización física, mecánica y térmica de materiales vernáculos de la región Sierra del Ecuador," Dec. 2015, Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12566>
- [8] T. William. Lambe and R. V. Whitman, *Soil mechanics*. Wiley, 1969.
- [9] Y. Zeng, B. Huang, Y. Zou, and Y. Bai, "Numerical Study on Static and Dynamic Load Response of Temporary Support System for Group Tunnels Excavation," *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 1719, vol. 12, no. 10, p. 1719, Oct. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS12101719.
- [10] P. Yang, J. ming Ke, J. G. Wang, Y. K. Chow, and F. bin Zhu, "Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation," *Comput Geotech*, vol. 33, no. 6–7, pp. 330–340, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.COMPGEO.2006.07.006.
- [11] P. Marinos and E. Hoek, "Gsi: A Geologically Friendly Tool For Rock Mass Strength Estimation." OnePetro, Nov. 19, 2000. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/>
- [12] Z. T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley, 1989. Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.booktopia.com.au/engineering-rock-mass-classifications-z-t-bieniawski/book/9780471601722.html>