

Estudio geológico y geotécnico en suelos no consolidados, para la instalación de micropilotes, en el túnel de salida de descarga en la Hidroeléctrica de San Gabán III, Carabaya, Puno

Geological and geotechnical study in unconsolidated soils, for the installation of micropiles, in the Discharge Exit Tunnel at the San Gaban III Hydroelectric Plant, Carabaya – Puno

Edwar Manuel Zapata Castillo¹

Recibido: 19/01/2023 - Aprobado: 20/03/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

Este trabajo de investigación se basa en el problema de los suelos no consolidados, que se presentaron en la zona de excavación del túnel de salida de descarga de 60 metros de longitud, considerado el más crítico de la obra por el tipo de terreno y debido a que la excavación se realizó por debajo de la carretera Interoceánica con coberturas de encampane de 4.20 a 13.70 metros aproximadamente. Los procedimientos que se realizaron fueron: un modelamiento numérico para analizar el factor de seguridad, tres ensayos de laboratorio de granulometría y tres sondeos exploratorios sin recuperación de testigos. Durante la excavación, según el avance, se realizaron evaluaciones geomecánicas y monitoreo de deformaciones en la superficie de la excavación. Debido a los factores litológicos y estructurales desfavorables de la zona de trabajo, la excavación se realizó en forma mecánica en tres etapas, bóveda y hastiales.

De acuerdo a los resultados del modelamiento numérico, ensayos de laboratorio y sondeos que se realizaron, se identificaron factores litológicos y estructurales desfavorables, razón por la cual se instalaron micropilotes tipo paraguas inyectados con lechada de agua y cemento, para garantizar la estabilidad del túnel antes, durante y después de la excavación.

Palabras claves: Análisis numérico, Geomecánica en túneles, micropilotes, suelos cuaternarios, inyecciones de consolidación.

ABSTRACT

This research work is based on the problem of unconsolidated soils, which occurred in the excavation area of the 60-meter-long Discharge Exit tunnel, this tunnel was considered the most critical of the work due to the type of terrain and because the excavation was carried out below the Interoceanic highway with encampane coverage of approximately 4.20 to 13.70 meters. The procedures that were performed; a numerical modeling to analyze the safety factor, three granulometry laboratory tests, three exploratory boreholes without core recovery and during the excavation according to each advance geomechanical evaluations and monitoring of deformations on the excavation surface, due to lithological and structural factors unfavorable in the work area, the excavation was carried out mechanically in three stages, vault and gables.

According to the results of the numerical modeling, laboratory tests and surveys that were carried out, unfavorable lithological and structural factors were identified and due to these factors, umbrella-type micropiles injected with water and cement grout were installed to guarantee the stability of the tunnel before during and after excavation.

Keywords: Numerical analysis, Geomechanics in tunnels, Micropiles, Quaternary soils, Consolidation injections.

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Departamento Académico de Ingeniería de Minas. Lima, Perú.

E-mail: edwar.zapata1@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4580-8372>

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en la zona de excavación del túnel de salida de descarga, en la Central Hidroeléctrica de San Gabán III. El proyecto generará 206 MW de energía, donde se utilizarán las aguas del río de San Gabán. Se excavará un promedio de 14,615 km de túnel de conducción; el tipo de roca donde se realiza la excavación del túnel principal, corresponde a rocas metamórficas esquistas y pizarras, también se excavó en roca intrusiva granodiorita. Las secciones del túnel son tipo herradura y sus dimensiones varían según el tipo de roca, con un promedio de secciones de altura de 5.96 metros y de ancho de 6.06 metros. Se realizó con el método de voladura un promedio del 50% de excavación del túnel y con el método de perforadora TBM el 50% restante. Con los dos métodos de excavación mencionados se realizaron las evaluaciones geomecánicas por cada avance, con el método del cálculo del RMR (Bieniaswski).

El área de estudio corresponde a unos de los túneles del proyecto, considerado el más crítico en la excavación. Se le designó el nombre de acuerdo a la función que desempeñará como túnel de salida de descarga, con sección de 6.70 metros de altura y 6.80 metros de ancho y una longitud promedio de 60 metros, por este túnel pasarán las aguas que vienen por todo el proceso del recorrido, desde la Bocatoma hasta la Casa de Máquinas y descarga hacia el río San Gabán. El tipo de terreno que se encuentra en la zona de trabajo es de origen cuaternario, formado por depósitos coluviales, conformado por bloques de roca de aproximadamente 2.00 metros de longitud, con un ancho de 1.50 metros; de material over, cantos rodados, gravas angulosas y subangulosos, estratos de arena color gris amarillento claro, en matriz arena arcillosa; todo este material cuaternario está húmedo con pequeñas filtraciones de agua.

Según los factores geológicos y geotécnicos desfavorables que se presentaron en el área de trabajo, antes de la excavación se colocaron micropilotes tipo paraguas de 35 metros de longitud, con diámetros de 108 milímetros, espaciados a 0.40 metros, con ángulos de inclinación de 10° a 15° grados e inyectados con lechadas de agua y cemento

y presiones de inyecciones de 10 a 15 bares; en total se instalaron 47 micropilotes, para consolidar el terreno que se excavó.

Se realizó un modelo numérico con el programa Phase 2 de Rocscience para el análisis de factor de seguridad; para el estudio del terreno se realizaron ensayos de granulometría, estudios geotécnicos de sondeos sin recuperación de testigos, evaluaciones geomecánicas y seis monitoreos de estabilidad en la misma carretera Interoceánica.

1.1 Área de estudio

La zona del proyecto se ubica geográficamente dentro del sistema de coordenadas UTM, 13°26'0" S, 70°23'22", que corresponde a la parte alta de la red hidrográfica de la zona, específicamente en el distrito de San Gari, Carabaya, Puno, Perú, como se muestra en la Figura 1.

En esta zona se ubican los caseríos de Uruhuasi, Icaro, Mayhunati, San Gari, Lanlacuni Alto, Chaquimayo y los fundos que corresponden a cada caserío. El distrito de San Gari limita por el norte con la desembocadura del río San Gabán; por el sur, con la boca del Chía, en el mismo río San Gabán; por el este, con *divortium aquarum*, con el Inambari y el Esquilaya; y por el oeste, con el *divortium aquarum*, con el Inambari y el Palca.

II. MÉTODOS

En este trabajo la investigación es de tipo aplicada. La investigación en tecnologías físicas está orientada a crear, mejorar, optimizar máquinas, equipos, instrumentos, mecanismos, procedimientos y sistemas en el campo de la tecnología de los ingenieros (civil, agrícola, agronomía, ambiental, pesquera, industrial, minera, geotécnica, de petróleo, etc. (Piscoya 1987).

La investigación científica es desde un punto de vista cuantitativo. Pese a tratarse de un proceso metódico y sistemático no existe un esquema completo de validez universal aplicable mecánicamente a todo tipo de investigación (Monje 2011).

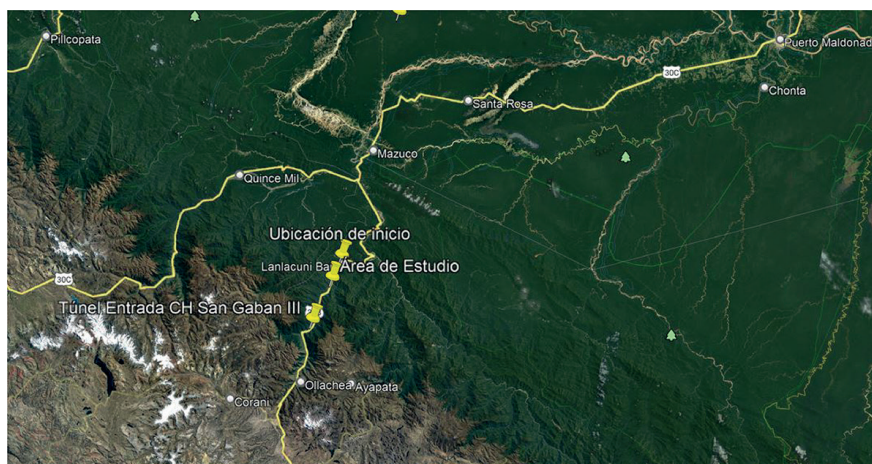


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. Fuente Google Earth Pro

El diseño de la investigación es cuasiexperimental. La experimentación en el laboratorio es una forma central para probar hipótesis, pero no la única, razón por la cual se desarrollaron diseños cuasiexperimentales (Mertens 2005).

La finalidad de este trabajo de investigación es el estudio de los suelos no consolidados para la instalación de micropilotes tipo paraguas, por esta razón se realizaron diferentes estudios geológicos y geotécnicos para analizar la estabilidad del terreno:

- a. Se realizó un perfil para determinar las zonas de cobertura desde el eje de la corona del túnel hasta la superficie de la carretera Interoceánica.
- b. Se desarrolló el modelamiento numérico con el programa Phase 2 de Rocscience, para analizar el factor de seguridad con la instalación de micropilotes y los esfuerzos *in situ* de la zona de trabajo.
- c. Se realizaron tres ensayos de granulometría, para analizar el porcentaje de los materiales de la zona de trabajo.
- d. Se hicieron tres sondeos geotécnicos de 35 metros de longitud en el hastial izquierdo, derecho y en la zona de bóveda, para analizar el tipo de terreno en el campo de trabajo.
- e. Se realizaron 88 evaluaciones geomecánicas, con el método del RMR de (Bieniaswski), en el tramo de los 60 metros de longitud del túnel excavado, para obtener los parámetros litológicos y estructurales de la zona de estudio, la excavación se realizó en forma mecánica en tres fases, de acuerdo a la evaluación geomecánica se realizó un mapeo geomecánico de la zona excavada; también se hizo el sostenimiento con shotcrete de 0.20 metros, con fibra metálica y cimbras espaciadas a 0.50 y 0.80 metros, según las zonas de cobertura por cada avance.

- f. Se llevó a cabo el control de deformación del terreno por medio de monitoreos, cuyos puntos se instalaron en la superficie de la carretera Interoceánica, medidos con estación total. Se instalaron 6 puntos de monitoreo.

Todos estos métodos nos permitieron estudiar el espacio de trabajo y garantizar la estabilidad de la zona excavada.

III. RESULTADOS

Luego de los modelamientos, ensayos, sondeos y el mapeo geomecánico que se realizaron para garantizar la estabilidad del túnel de salida de descarga durante el proceso de excavación, obtuvimos los siguientes resultados:

3.1 Perfil de la zona de estudio

Se realizó un perfil en vista lateral de la zona de estudio para determinar las coberturas de encampane, desde el eje de la bóveda hasta la superficie de la carretera Interoceánica (Figura 2), donde la menor cobertura es de 4.20 metros y la mayor, es de 13.70 metros, con la finalidad de determinar las zonas con condiciones estructurales desfavorables y tener en cuenta al momento de realizar la excavación, como controles de avance para garantizar la estabilidad del túnel.

En la Figura 2, se muestra el perfil de la zona de trabajo desde la progresiva 0+000.00 hasta la 0+060.00, las coberturas que van desde la corona del túnel hacia la zona de superficie de la carretera Interoceánica.

Según el perfil realizado, las coberturas más bajas están en toda la influencia del pavimento de la carretera Interoceánica, entre los 4.20 a 5.00 metros aproximadamente. Otras condiciones desfavorables; es la calidad del terreno muy mala en este lugar por sus propias características y el paso de las unidades móviles; estos factores aumentan el grado de inestabilidad de la zona de excavación, razón por la cual deben estar mapeadas para el momento de la excavación del túnel.

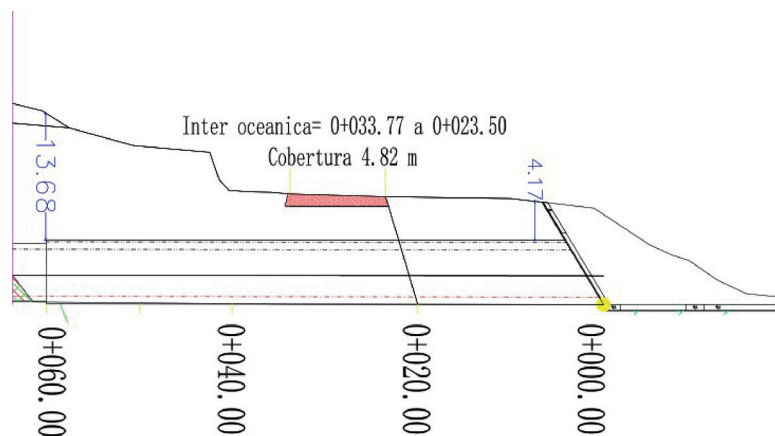


Figura 2. Perfil de zonas de cobertura en el área de trabajo. Fuente propia

3.2 Modelamiento numérico con el programa Phase 2 de Rocscience

En los modelamientos que se realizaron con el programa Phase 2 de Rocscience, modelamos dos horizontes de terreno; el primer horizonte conformado por suelo de relleno con material coluvial y el segundo horizonte conformado con material coluvial, con las propiedades físicas del terreno, para suelo de relleno con material coluvial, se modeló con un ángulo de fricción de 28 y cohesión de 5 KPa y para suelos coluviales se modeló con un ángulo de fricción de 25 y cohesión de 5 KPa., el modelamiento se realizó con la instalación de micropilotes de 35.00 metros de longitud, 108 milímetros de diámetro, espaciados a 0.40 metros y shotcrete de 0.20 metros, con fibra metálica de 25 MPa; se tomaron en cuenta las coberturas de 4.20 metros, desde la bóveda del túnel hacia la carretera Interoceánica, el análisis se realizó con el paso de vehículos y la carga natural del terreno, que fueron de 0.05 y 0.624 MN/m².

Según el modelamiento que se realizó con los factores y condiciones ya mencionadas, se obtuvieron factores de seguridad para el estado estático de 1.89 (Figura 3) y para el estado pseudoestático de 1.58 (Figura 4), para esta área se utilizó sísmica de la zona de 0.125 y esfuerzos de 30°, cumpliendo los factores de seguridad, exigidos por la norma del; MTC, R.D N 36-2016-MTC-14, lo que garantiza la estabilidad durante la excavación del túnel en suelos no consolidados. En los problemas de ingeniería estructural,

se hace día a día más evidente la necesidad de modelar más ajustadamente el fenómeno físico real a partir de modelos virtuales numéricos, (Mafud 2019).

3.3 Ensayos de laboratorio de granulometría

Se realizaron 3 ensayos de laboratorio de granulometría del material de la zona, se extrajeron muestras del lado izquierdo, media y derecho, como se observa en las tablas 1.2 y 3, por donde se realizó la excavación según la norma del MTC E-107, E-108 AASHTO T-27, ASTM D422. En los tres ensayos se obtuvo un promedio de porcentajes de arena de 61.30 %, gravas de 23.67, bolonería 9.53 % y limos de 4.83; según estos porcentajes es considerado un material de permeabilidad de buena a pobre, la extracción de estas muestras se realizó a través de calicatas. Son excavaciones del terreno de profundidad pequeña a media, realizadas normalmente con pala retroexcavadora. Es una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, estudios edafológicos o pedológicos de un suelo, (Gallarday 2017).

- En el primer ensayo realizado en la zona izquierda se obtuvieron, según la clasificación (SUCS) un material SP y según la clasificación (AASHTO), un material A-1-b, con mayor porcentaje de arena de 47.00%, grava de 2 “de 33.50 %, bolonería de 15.30 % y finos de 3.30 %, según la descripción (SUCS) el material es arena pobremente gradada con gravas.

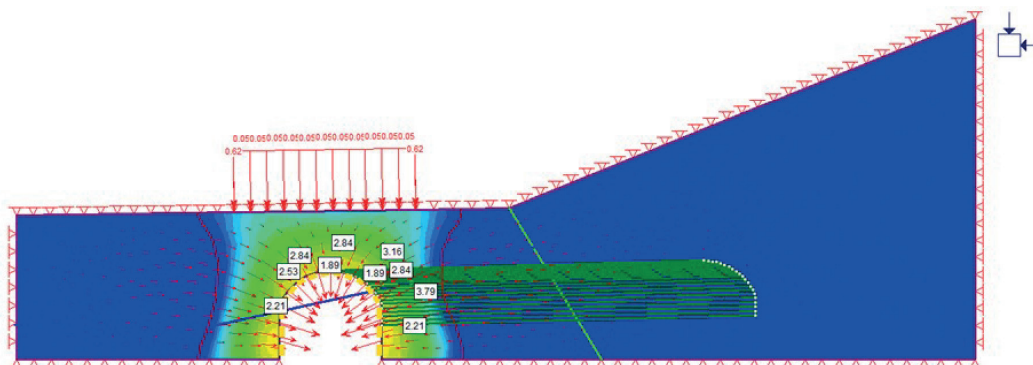


Figura 3. Modelamiento numérico, condición estática. Fuente: Programa Phase de Rocscience

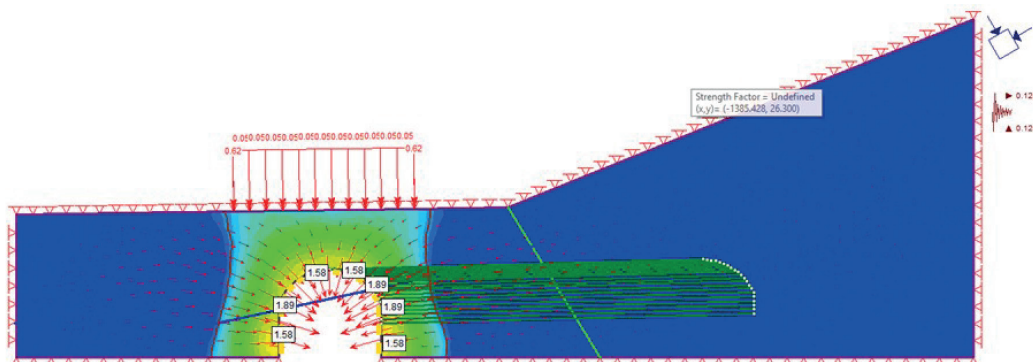


Figura 4. Modelamiento numérico condición pseudoestático. Fuente: Programa Phase de Rocscience

Tabla 1. Análisis granulométrico de material, zona izquierda

Tamaño máximo	21/2"
Peso inicial seco	12834.5 gramos
Peso lavado seco	12406.4 gramos
Contenido de humedad %	4.9
Clasificación (SUCS)	SP
Clasificación (AASHTO)	A-1-b
Índice de grupo	(0)
Descripción (AASHTO)	Bueno
Descripción (SUCS)	Arena pobremente gradada con grava
Bolonería > 2"	15.30
Grava 2" - N.º 4	33.
Arena N.º 4	47.90
Finos < N.º 200	3.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Análisis granulométrico del material, zona media

Tamaño máximo	3/4"
Peso inicial seco	9125.5 gramos
Peso lavado seco	8468.3 gramos
Contenido de humedad %	4.9
Clasificación (SUCS)	SP -SM
Clasificación (AASHTO)	A-3
Índice de grupo	(0)
Descripción (AASHTO)	Bueno
Descripción (SUCS)	Arena pobremente gradada con limo
Bolonería > 2"	0
Grava 2" - N.º 4	0.8
Arena N.º 4	92.00
Finos < N.º 200	7.2

Fuente: Elaboración propia

- En el segundo ensayo realizado en la zona media se obtuvieron, según la clasificación (SUCS), un material SP-SM y según la clasificación (AASHTO), un material A-3, con mayor porcentaje de arena de 92.00%, grava de 2 "de 0.8 %, bolonería de 0.00 % y finos de 7.2 %, según la descripción (SUCS), el material es arena pobremente gradada con limo.
- En el tercer ensayo realizado en la zona derecha se obtuvieron, según la clasificación (SUCS), un material SP y según la clasificación (AASHTO), un material A-1-b, con mayor porcentaje de arena del 45.00%, grava de 2 del 36.70 %, bolonería de 13.60 % y finos del 4.0 %, según la descripción (SUCS), el material es arena pobremente gradada.

3.4 Sondeos geotécnicos

Se realizaron tres sondeos exploratorios, sin recuperación de testigos en la zona del hastial izquierdo (Figura 5), bóveda (Figura 6) y hastial derecho (Figura 7), según los resultados se describe el terreno como suelo de permeabilidad bueno a pobre y según la calidad de la roca, como muy malo; en las tablas 04, 05 y 06, se utilizan términos en la parte del sostenimiento con las siguientes siglas; S= Shotcrete, C= Cimbras y M = Micropilotes.

- Con el sondeo realizado en el hastial izquierdo, se evidencia material de bloques, gravas, arenas y limos, material con resistencia muy blanda, color de agua de gris amarillento claro y amarillento grisáceo claro, con retornos de agua de un 25 a 30 por ciento.
- Se muestran los parámetros litológicos y estructurales que se obtuvieron por cada tramo de perforación en una longitud de 35 metros.

Tabla 4. Primer sondeo exploratorio realizado en el hastial izquierdo

Sondeo horizontal del túnel de salida de descarga el hastial izquierdo						
Progresiva Km.	Descripción litológica	Tipo de roca	Resistencia	Sostenimiento	Color de agua	% Retorno
0+000						
0+003	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	30
0+006	Suelos con presencia de gravas, arcillas, arenas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	30
0+009	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	30
0+012	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	30
0+015	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	30
0+018	Suelos con presencia de grava y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	30
0+021	Suelos con presencia de grava y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	30
0+024	Suelos con presencia de grava y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	25
0+027	Suelos con presencia de grava y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	25
0+030	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	25
0+033	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	25
0+035	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	25

Fuente: Elaboración propia



Figura 5. Sondeo geotécnico realizado en el hastial izquierdo

- Con el sondeo realizado en la bóveda se evidencia material arcilloso con gravas y presencia de bloques en menor proporción, con resistencia muy blanda, color de agua gris amarillento claro y retornos de agua de 5 a 10 por ciento.

Se muestran los parámetros litológicos y estructurales que se obtuvieron por cada tramo de perforación en una longitud de 35 metros.

- En el sondeo realizado en el hastial derecho, se evidencia material de bloques, gravas, arenas y limos, material con resistencia muy blanda, color de agua gris amarillento claro y amarillo grisáceo claro, con retornos de agua de un 25 a 35 por ciento.

Se muestran los parámetros litológicos y estructurales que se obtuvieron por cada tramo de perforación en una longitud de 35 metros.

Tabla 5. Segundo sondeo exploratorio realizado en la bóveda central

Sondeo horizontal en el túnel de salida de descarga, bóveda						
Progresiva Km.	Descripción litológica	Tipo de roca	Resistencia	Sostenimiento	Color de agua	% Retorno
0+000						
0+003	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+006	Suelos con presencia de gravas, arcillas, arenas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+009	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+012	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+015	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+018	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+021	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro	5
0+024	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	10
0+027	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	10
0+030	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	10
0+033	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	10
0+035	Suelos con presencia de grava, arcillas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	10

Fuente: Elaboración propia

**Figura 6.** Sondeo geotécnico realizado en la zona de bóveda

Tabla 6. Tercer sondeo exploratorio realizado en el hastial derecho

Sondeo horizontal del túnel de salida de descarga, hastial derecho						
Progresiva Km.	Descripción litológica	Tipo de roca	Resistencia	Sostenimiento	Color de agua	% Retorno
0+000						
0+003	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	35
0+006	Suelos con presencia de gravas, arcillas, arenas y bloques.	V	Muy blando	S, C y M.	Amarillo grisáceo claro	35
0+009	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+012	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+015	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+018	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+021	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+024	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+027	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+030	Suelos con bloques, presencia de material arcilloso y presencia de gravilla.	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+033	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25
0+035	Suelos con presencia de arenas, arcilla, gravas y bloques	V	Muy blando	S, C y M.	Gris amarillento claro.	25

Fuente: Elaboración propia



Figura 7. Sondeo geotécnico realizado en el hastial derecho

3.5 Descripción geomecánica según el método de RMR de Bieniaswski

De acuerdo al avance de la excavación se realizaron las evaluaciones geomecánicas con el método del RMR de (Bieniaswski), en total fueron 88 evaluaciones, en

60 metros de excavación. Se muestra en la Tabla 07 el consolidado de parámetros litológicos y estructurales en tres tramos, teniendo en cuenta el resultado del RMR; según los parámetros obtenidos es un terreno de muy mala calidad, formado por suelos cuaternarios coluviales, con

presencia de bloques, cantos rodados, gravas, arena, arcilla y limos, con filtraciones de agua en forma puntual.

En la Figura 8 se muestra el mapeo geomecánico realizado en la excavación del túnel resumiendo sus parámetros litológicos y estructurales, según el método del RMR de (Bieniaswski).

Los resultados de la evaluación realizada son las siguientes:

- Desde la progresiva 0+000.00 hasta la 0+037.80, suelo con resistencias muy blanda, presenta estrato de arena arcillosa en hastiales con dirección de buzamiento y buzamiento de 20°/30°, se consideró

suelo descompuesto debido al material coluvial que presentó.

- Desde la progresiva 0+037.80 hasta la 0+040.80, suelo con resistencias muy blanda, presenta estrato de arena arcillosa en hastiales con dirección de buzamiento y buzamiento de 20°/35°, se consideró suelo muy alterada, con terreno más estable.
- Desde la progresiva 0+040.80 hasta la 0+060.00, suelo con resistencias blanda, presenta estrato de arena arcillosa en hastiales con dirección de buzamiento y buzamiento de 20°/35°, se consideró suelo muy alterada, con terreno más estable.

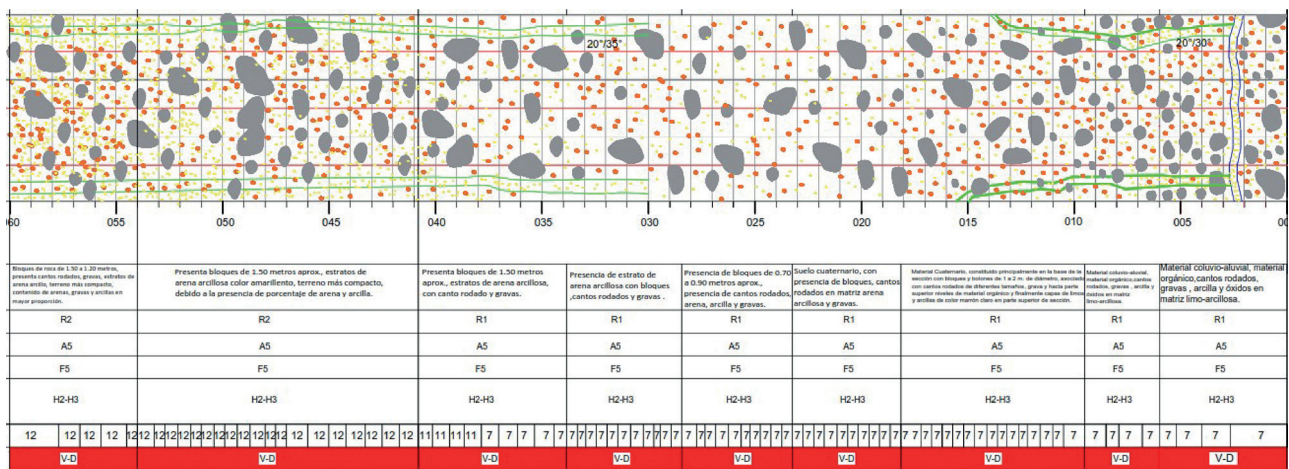


Figura 8. Mapeo geomecánico de la zona de trabajo. Fuente propia

Tabla 7. Consolidado de parámetros litológicos y estructurales, según el método del RMR de (Bieniaswski)

Parámetros de las evaluaciones geomecánicas con el método del RMR de Bieniaswski												
Tramos	Resistencia (Mpa.)	RQD	Sep.	Long.	Aber.	Rug.	Rel.	Alt.	Agua	Orientación	RMR	Tipo de roca
0+000.00 - 0+037.80	1	3	5	0	0	0	0	0	10	12	7	V
0+037.80 - 0+040.80	1	3	5	1	1	1	1	0	10	12	11	V
0+040.80 - 0+060.00	2	3	5	1	1	1	1	0	10	12	12	V

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión = R
 Designación de calidad de roca = RQD.
 Separación = Sep.
 Longitud = Long.
 Abertura = Aber.

Rugosidad = Rug.
 Relleno = Rel.
 Alteración = Alt.
 Clasificación del macizo rocoso = RMR.

3.6 Monitores de deformación

Se instalaron 6 puntos de monitoreo de deformación en la carretera Interoceánica, como se muestra en la (Figura 9), por encima de la zona del túnel que fue excavado, para realizar mediciones de convergencia antes, durante y después del proceso de excavación. En la (Figura 10) se

muestra una vista panorámica de la carretera Interoceánica y del túnel de descarga de salida, las lecturas se realizaron a diario durante todo el proceso de excavación, donde se verificó la estabilidad del terreno, los puntos de monitoreo tuvieron la siguiente denominación P1, P2, P3, P4, P5 y P6.

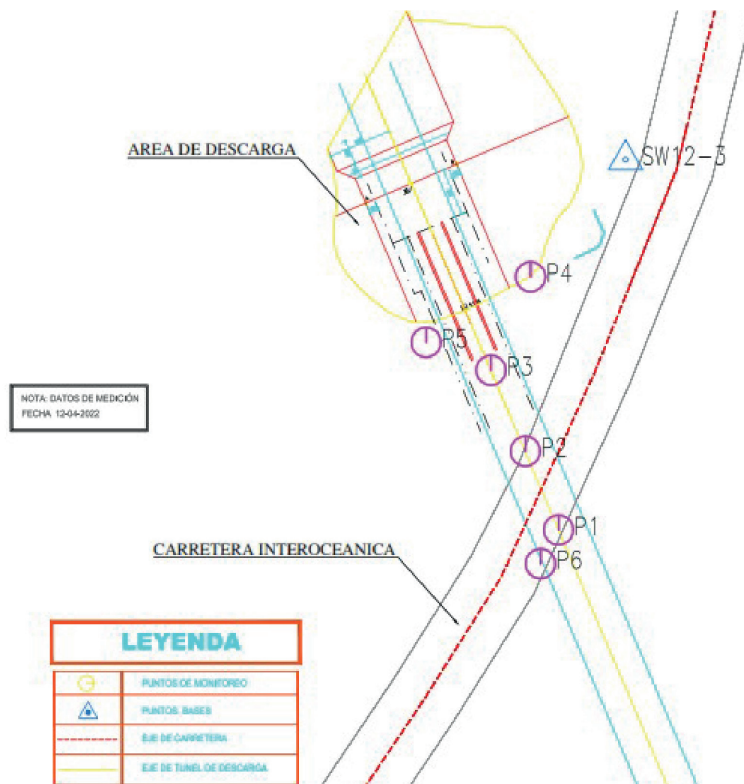


Figura 9. Ubicación de los puntos de monitoreo. Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Vista aérea de la zona de trabajo

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación corresponden al modelamiento, ensayos, estudios geotécnicos, geomecánicos y los puntos de monitoreo de deformación del terreno, que se realizaron en la zona de trabajo, para analizar los factores litológicos y estructurales desfavorables de la zona. A continuación, se dan los resultados:

- De acuerdo al perfil realizado en la zona de trabajo y al modelamiento numérico con el tipo de terreno en la zona de excavación, para determinar el factor de seguridad se analizaron las zonas con coberturas más bajas, donde se realizaría la excavación para garantizar la estabilidad, pasando por la zona de influencia de la carretera Interoceánica. Estas coberturas fueron de 4.20 a 5.00 metros; debido a estos factores litológicos y estructurales desfavorables, se instalaron



Figura 11. Muestras de la obtención de material en los sondeos geotécnicos



Figura 12. Tipo de terreno de suelos no consolidados, condición muy mala

los micropilotes tipo paraguas de 35 metros de longitud, 108 milímetros de diámetro, con ángulos de 10° a 15° grados, que garantizarían la zona de influencia de coberturas bajas.

- Según los sondeos geotécnicos, que se muestra en la Figura 11, el material obtenido de los ensayos de laboratorio de granulometría que se realizaron en la zona de trabajo, se evidencia una gran semejanza en el tipo de terreno que se obtuvo en ambos estudios, con presencia de bloques, cantos rodados, material over, material arcilloso y arena. De acuerdo a estos dos estudios geotécnicos se diseñó la dosificación de mezclas de inyección

de lechada de agua y cemento con una relación de 1:1, para la inyección de consolidación del terreno, según los resultados, se realizaron dos procesos de rechazo de inyección; la primera llegó a presiones de 10 a 15 bares y la segunda, por volumen de lechada, con la finalidad de no hidrofracturar el terreno en la zona de excavación y la carretera Interoceánica.

- Se realizaron evaluaciones geomecánicas en cada avance de la excavación para obtener los paramentos litológicos y estructurales del terreno y para analizar las zonas con factores geológicos y estructurales desfavorables, cuyos resultados



Figura 13. Instalación de micropilotes en el portal del túnel

nos permiten tomar alguna acción inmediata de sostenimiento y así garantizar la estabilidad del túnel. Se muestra en la Figura 12 el tipo de terreno que se evaluó, de condición muy mala, considerado terreno tipo V.

Para el macizo rocoso se utilizó la clasificación geomecánica de Bieniawski, que considera cinco parámetros: la resistencia compresiva de la roca intacta, el promedio del espaciado del sistema de fracturas dominante, el grado de fracturamiento RQD de Deere, las condiciones de la masa rocosa (la persistencia de la fractura, apertura de la fractura, rugosidad de las caras de la fractura, el relleno que se encuentra en la fractura y el grado de alteración que sufre la masa rocosa) y la presencia de agua subterránea; con lo que se obtiene el valor del RMR básico (solo cuando se requiere conocer únicamente la calidad de la masa roca pero no se hará ningún trabajo en ella). Adicionalmente, se requiere hacer un ajuste por orientación en relación al sistema dominante. (Valencia y Guadalupe 2021).

- Para el monitoreo se colocaron 6 puntos en zonas estratégicas de la carretera Interoceánica, que nos permitió analizar la deformación del terreno y tomar medidas inmediatas de intervención ante cualquier deformación que pueda comprometer la estabilidad del túnel y la carretera Interoceánica. Las convergencias vienen siendo aplicadas a muchos proyectos de excavación subterránea, sin embargo, para evitar colapsos o inestabilidades en sostenimientos, se puede aplicar el modelo geológico-geotécnico analizado; el ambiente geológico que analiza este modelo se fundamenta en roca tipo III, IV y tipo V, (Ángeles 2021).

- Según los estudios y ensayos que se realizaron, se colaron los micropilotes tipos paraguas, ejecutados como sostenimiento del terreno en la excavación de túneles, normalmente antes de la fase de avance, bien con carácter general en una obra, en emboquilles, en zonas de especial dificultad, Ministerio de Fomento de España (2005), como se observa en la Figura 13, en el portal del túnel. Este sistema de sostenimiento se realizó para estabilizar el terreno durante la excavación debido a las factores litológicos y estructurales desfavorables de la zona de trabajo. Esto se debe tener en cuenta a fin de garantizar una buena instalación e inyección, cumpliendo con todos los estándares de los procedimientos de trabajo como son la dosificación de lechada, presión, inclinación, entre otros.

V. CONCLUSIONES

- Los suelos no consolidados que se presentaron en la zona de excavación y las bajas coberturas, que van desde la corona del túnel hacia la carretera Interoceánica, fueron los dos factores geológicos y estructurales desfavorables en el proceso de excavación y construcción del túnel.
- Los estudios geológicos y geotécnicos que se realizaron antes, durante y después de la excavación fueron para analizar los materiales que se encontraban en la zona de trabajo y realizar sostenimiento y controles de deformación para garantizar la estabilidad del túnel en el proceso de excavación y tomar medidas ante cualquier problema de colapso que pudo suceder.

- La instalación de los micropilotes tipo paraguas en todo el contorno del portal del túnel, tuvo la finalidad de consolidar el terreno en la zona de influencia de la sección del túnel y como sostenimiento.
 - Se culminó la excavación y construcción del túnel, sin ningún problema de colapso y asentamiento del terreno en toda la zona de influencia del área de trabajo.
- Valencia Chávez, E. y Guadalupe Gómez E. (2021), *Diseño de sostenimiento dinámico para mitigar los estallidos de rocas*. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM, 24 (47), 191-199. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/20646>

Conflicto de intereses

El autor declaran no tener conflicto de intereses.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por facilitar la publicación de mi artículo de investigación y a la empresa CWE Construcción, por haberme dado las facilidades para realizar el estudio en la zona de trabajo del túnel de descarga de salida.

VII. REFERENCIAS

- Ángeles, B.R. (2021), *Modelo de monitoreo geológico-geotécnico mediante convergencias para definir el sostenimiento final de un túnel con fines civiles y mineros - túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Cheves*. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM, 24 (48), 13-25. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21704>
- Mafud, E.D. (2019), *Capacidad portante de micropilotes en suelos cementados*, [Tesis de Maestría] Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/wp-content/uploads/sites/22/2019/10/Tesis-de-Magister.pdf>
- Gallarday, B.T. (2017), *Estabilidad de las obras civiles en la corona del Malecón Costanera, distrito de San Miguel, Lima*. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM, 20 (40), 102-113. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/14399/12731>
- Mertens, D. M. (2005), *Historia de los enfoques cuantitativo, cualitativo y mixto: raíces y momentos decisivos*. Colegio de México *Metodología de la Investigación* (5ta. Ed.). <https://www.studocu.com/es-mx/document/el-colegio-de-mexico/metodos-cualitativos/historia-de-los-enfoques-cuantitativo-cualitativo-y-mixto-raices-y-momentos-decisivos/10348892>
- Monje, A. A. (2011), *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa, guía didáctica*, Universidad Surco. Colombia. Facultad de Ciencias Sociales. Programa de Comunicación Social y Periodismo Neiva 2011, Colombia. <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>
- Ministerio de Fomento, de España. (2005). *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera*. https://www.mitma.es/recursos_mfom/0710200.pdf.
- Piscoya, H. R. (1987), *Investigación científica y educacional un enfoque epistemológico*. Lima: Amaru Editores.