

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Estudio geotécnico para la construcción de un stock de mineral y
Haul raod sobre fundación de baja resistencia de origen
fluvioglacial**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Robert Nelson Mendoza Camilla

 [0009-0004-2808-4215](https://orcid.org/0009-0004-2808-4215)

Asesor

M.Sc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Mendoza Camilla [1]
Referencia/Reference	[1] R. Mendoza Camilla, <i>“Estudio geotécnico para la construcción de un stock de mineral y Haul road sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial”</i> [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Mendoza, 2025)
Referencia/Reference	Mendoza, R. (2025). <i>Estudio geotécnico para la construcción de un stock de mineral y Haul road sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A Dios mi creador y guía. A mi familia que me ha apoyado y
motivado en este proceso. A mi madre por su amor
incondicional.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional y amor, sin su motivación y sacrificio no hubiese podido llegar a este momento. Gracias por ser mi roca y mi inspiración.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar las condiciones geotécnicas de una laguna natural de origen fluvioglacial para determinar la viabilidad y seguridad de la construcción de una rampa y un stock, asegurando su estabilidad estructural y minimizando los riesgos de falla. Para ello, se realizaron diversas investigaciones geotécnicas que incluyeron cuatro sondajes con posteadora manual, tres ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), muestreo de material granular de desmonte y ensayos geofísicos mediante cinco líneas de refracción sísmica y un ensayo MASW.

Los resultados obtenidos permitieron una caracterización integral del suelo de fundación, estableciendo un perfil sísmico diferenciado en la zona de la Rampa Copaycocha. Se identificó una capa de suelo de cobertura blando con un espesor de hasta 3.0 a 5.0 metros y velocidades de propagación de ondas sísmicas (V_p) entre 260 m/s y 389 m/s, seguida de un estrato de material morrénico de hasta 17 metros de espesor con velocidades V_p entre 1 123 m/s y 1 331 m/s, y finalmente una roca alterada con velocidades V_p entre 2 108 m/s y 2 752 m/s. Estos hallazgos fueron clave para definir la capacidad portante del terreno y la profundidad óptima de cimentación.

Se recomienda la remoción de material inadecuado hasta una profundidad mínima de 3.0 metros, tomando en cuenta la posible presencia de sectores con suelos saturados que podrían comprometer la estabilidad de la estructura. Asimismo, los ensayos químicos indicaron una agresividad moderada del suelo, por lo que se recomienda el uso de cemento tipo V para garantizar la durabilidad de la cimentación. Finalmente, los análisis de estabilidad demostraron que la rampa y el stock cumplen con los factores de seguridad requeridos, dado que los F.S. estático y pseudo-estático en los casos analizados son mayores a 1.3 y 1.0, respectivamente, asegurando su estabilidad a lo largo de su vida útil.

Palabras clave — Evaluación geotécnica, estabilidad de taludes, cimentación, resistencia del suelo, refracción sísmica, capacidad portante, factor de seguridad.

Abstract

The present research aims to evaluate the geotechnical conditions of a natural fluvioglacial lagoon to determine the feasibility and safety of constructing a ramp and a stockpile, ensuring their structural stability and minimizing the risk of failure. To achieve this, various geotechnical investigations were carried out, including four boreholes using a manual auger, three light dynamic penetration tests (DPL), sampling of granular waste material, and geophysical tests through five seismic refraction lines and one MASW test.

The results obtained allowed for a comprehensive characterization of the foundation soil, establishing a differentiated seismic profile in the Copaycocha Ramp area. A soft cover soil layer was identified with a thickness of up to 3.0 to 5.0 meters and seismic wave propagation velocities (V_p) ranging from 260 m/s to 389 m/s, followed by a moraine material stratum up to 17 meters thick with V_p velocities between 1,123 m/s and 1,331 m/s, and finally an altered rock layer with V_p velocities between 2,108 m/s and 2,752 m/s. These findings were key in defining the bearing capacity of the terrain and the optimal foundation depth.

It is recommended to remove unsuitable material to a minimum depth of 3.0 meters, considering the possible presence of localized saturated soil pockets that could compromise the structure's stability. Additionally, chemical tests indicated moderate soil aggressiveness, so Type V cement is recommended to ensure foundation durability. Finally, the stability analyses demonstrated that the ramp and the stock meet the required safety factors, as the static and pseudo-static F.S. in the analyzed cases are greater than 1.3 y 1.0, respectively, ensuring their stability throughout their service life.

Keywords — Geotechnical evaluation, slope stability, foundation, soil strength, seismic refraction, bearing capacity, safety factor.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.3 Formulación del problema	3
1.4 Objetivo	3
1.5 Hipótesis	3
1.6 Operacionalización de variables	3
1.6.1 Variable independiente (V.I)	3
1.6.2 Variable dependiente (V.D)	4
1.7 Antecedentes referenciales	4
1.7.1 Antecedentes internacionales	4
1.7.2 Antecedentes nacionales	5
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	8
2.1 Marco teórico	8
2.1.1 Geotecnia y mecánica de suelos y rocas	8
2.1.2 Lagunas de origen fluvio-glacial	9
2.1.3 Estabilidad de taludes	12
2.1.4 Ensayos geotécnicos	14
2.1.5 Ensayos geofísicos	16
2.1.6 Ensayos de laboratorio	17
2.2 Marco conceptual	18
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	21
3.1 Recolección de datos	21

3.1.1	Unidad de estudio.....	21
3.1.2	Investigaciones geotécnicas	31
3.1.3	Ensayos geofísicos realizados.....	33
3.2	Procesamiento de la información	41
3.2.1	Ensayos de laboratorio realizados	41
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	45
4.1	Análisis geotécnico	45
4.1.1	Propiedades de los materiales.....	46
4.1.2	Análisis de estabilidad vía reducción de resistencia cortante.....	48
4.1.3	Análisis de estabilidad por equilibrio límite.....	49
4.1.4	Coeficiente sísmico.....	49
4.1.5	Análisis estático.....	49
4.2	Validación de hipótesis.....	60
	Conclusiones	62
	Recomendaciones	64
	Referencias bibliográficas.....	65
	Anexos	67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	4
Tabla 2 : Resumen de posteadoras zona Rampa Copaycocha.....	32
Tabla 3 : Resumen de ensayos DPL.....	32
Tabla 4 : Resumen de ensayos DPL.....	33
Tabla 5 : Resumen de ensayos de refracción sísmica	34
Tabla 6 : Características del equipo de refracción sísmica.....	35
Tabla 7 : Resultados de ensayos de refracción sísmica.....	37
Tabla 8 : Resumen de ensayos MASW.....	38
Tabla 9 : Resultados de ensayos MASW	39
Tabla 10: Determinación de parámetros dinámicos	40
Tabla 11: Valores de Vs30.....	41
Tabla 12: Resumen de los ensayos estándar de clasificación de suelos – Rampa Copaycocha	42
Tabla 13: Resumen de ensayos de gravedad específica de sólidos	42
Tabla 14: Resumen de ensayos de corte directo	43
Tabla 15: Resumen de los ensayos de compresión triaxial CU.....	43
Tabla 16: Resumen de ensayos químicos en suelos	44
Tabla 17: Resumen de valores permisibles	44
Tabla 18: Criterios de aceptabilidad.....	46
Tabla 19: Resumen de propiedades de resistencia.	47
Tabla 20: Resumen de factores de seguridad obtenidos por los métodos de reducción de resistencia y equilibrio límite.....	60
Tabla 21: Resultados de ensayos geofísicos	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Corte de plataforma	2
Figura 2 : Realización de trabajos cerca de laguna Copaycocha	3
Figura 3 : Ubicación de rampa de acarreo cerca de laguna Copaycocha.....	21
Figura 4 : Columna estratigráfica regional.....	26
Figura 5 : Esquema de distribución de shots – refracción sísmica	35
Figura 6 : Sismógrafo GEODE de 24 canales	36
Figura 7 : Esquema de distribución de shots – MASW.....	39
Figura 8 : Ubicación de secciones geotécnicas en Rampa Copaycocha.....	45
Figura 9 : Reducción de la resistencia al corte en un criterio de falla lineal	48
Figura 10: Materiales y secuencia constructiva, sección R1	50
Figura 11: Esfuerzos horizontales, sección R1	51
Figura 12: Esfuerzos verticales, sección R1	52
Figura 13: Esfuerzos de corte, sección R1.....	52
Figura 14: Presiones de poro, sección R1	53
Figura 15: Desplazamientos horizontales, condición estática, sección R1	54
Figura 16: Desplazamientos verticales, condición estática, sección R1	55
Figura 17: Factores de seguridad estáticos, sección R1	55
Figura 18: Factores de seguridad pseudo estáticos, sección R1	56
Figura 19: F. S. estático local, método equilibrio límite, Sección R2	57
Figura 20: F. S. pseudo estático local, método equilibrio límite, Sección R2	57
Figura 21: F. S. estático global, método equilibrio límite, Sección R2	58
Figura 22: F. S. pseudo estático global, método equilibrio límite, Sección R2.....	58
Figura 23: F. S. estático local, método equilibrio límite, Sección R2	59
Figura 24: F. S. pseudo estático local, método equilibrio límite, Sección R2	59
Figura 25: Prueba t de una muestra para F.S. estático y pseudo-estático	61

Introducción

La investigación se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo I abarca el planteamiento del problema, los objetivos del estudio, la hipótesis, las variables involucradas y los antecedentes referenciales que sustentan la importancia de la evaluación geotécnica en este tipo de proyectos.

En el Capítulo II, se desarrolla el marco teórico, abordando conceptos fundamentales de geotecnia y mecánica de suelos, estabilidad de taludes y los distintos ensayos geotécnicos, geofísicos y de laboratorio utilizados en la evaluación del terreno.

El Capítulo III se enfoca en el desarrollo de la investigación, detallando la unidad de análisis, las investigaciones geotécnicas de campo, los ensayos geofísicos y de laboratorio realizados para la caracterización del suelo.

Finalmente, el Capítulo IV presenta el análisis geotécnico, incluyendo la evaluación de las propiedades de los materiales, el análisis de estabilidad mediante la reducción de resistencia cortante, el análisis de estabilidad por equilibrio límite y el análisis estático de las estructuras.

El estudio concluye con un conjunto de hallazgos clave sobre la viabilidad del proyecto. Además, se incluyen referencias bibliográficas que respaldan la investigación y anexos fotográficos que documentan el proceso de evaluación.

Con ello, se busca contribuir al conocimiento en el campo de la ingeniería geotécnica aplicada a la minería y proporcionar información valiosa para futuros proyectos de infraestructura en entornos geotécnicamente desafiantes.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El desarrollo de infraestructuras mineras en entornos naturales complejos representa un desafío técnico significativo, especialmente cuando dichas estructuras deben emplazarse sobre terrenos con características geotécnicas poco favorables. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar las condiciones geotécnicas de una laguna de origen fluvioglacial para determinar la viabilidad y seguridad de la construcción de una rampa y un stock, asegurando su estabilidad estructural y minimizando los riesgos de falla.

La construcción de infraestructuras sobre suelos de origen fluvioglacial requiere un análisis detallado de las propiedades mecánicas y geotécnicas del terreno. Este estudio considera la caracterización del suelo mediante ensayos de campo y laboratorio, así como la aplicación de métodos de análisis geotécnico avanzados para evaluar la estabilidad de las estructuras proyectadas.

La metodología empleada se fundamenta en investigaciones geotécnicas, geofísicas y de laboratorio que permitirán definir las propiedades del terreno y establecer los criterios de diseño adecuados para garantizar la estabilidad del stock de mineral y Haul road.

1.2 Descripción del problema de investigación

La estabilidad geotécnica es un factor crítico en la construcción de infraestructuras mineras, especialmente en áreas con cuerpos de agua cercanos. En el tajo en cuestión, la presencia de dos lagunas naturales en los laterales representa un alto riesgo para la estabilidad del terreno.

A medida que se profundiza en la excavación, pueden generarse problemas de estabilidad en los taludes o filtraciones de agua hacia el fondo del tajo, lo que podría comprometer la seguridad de las operaciones mineras.

En 2017, se realizaron trabajos preliminares en la laguna Copaycocha para evaluar la viabilidad de la construcción de una rampa y un stock en esta zona. Se implementó una metodología de disposición de material con supervisión geotécnica permanente, observándose inicialmente una respuesta favorable del terreno. Sin embargo, al octavo día de trabajo se registró una falla en la fundación inducida por la resistencia del material vertido sobre la plataforma.

Ante esto, se tomaron medidas correctivas, como el recorte del talud afectado y la restricción de operaciones en horario nocturno.

Figura 1

Corte de plataforma



Fuente: Chinalco

Estos antecedentes evidencian la complejidad del terreno y la necesidad de realizar una evaluación geotécnica integral para garantizar la seguridad y estabilidad de la futura infraestructura.

Un análisis detallado permitirá determinar las condiciones del suelo, identificar riesgos potenciales y establecer estrategias de mitigación para evitar fallas estructurales que puedan afectar la operatividad y sostenibilidad del proyecto.

Figura 2

Realización de trabajos cerca de laguna Copaycocha



Fuente: Chinalco

1.3 Formulación del problema

¿En qué medida un mal estudio geotécnico de la fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial, incide en la inestabilidad e inseguridad en la construcción de un stock de mineral?

1.4 Objetivo

Evaluar las condiciones geotécnicas de la fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial para determinar la viabilidad y seguridad de la construcción de un stock de mineral, asegurando su estabilidad estructural y minimizando los riesgos de falla.

1.5 Hipótesis

Si se realiza un análisis geotécnico detallado del terreno y se implementan medidas de estabilización adecuadas, permitirá construir el stock de mineral sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del área.

1.6 Operacionalización de variables

1.6.1 Variable independiente (V.I)

- X1: Geotécnico.

- Propiedades geotécnicas (resistencia al corte, cohesión, compacidad, granulometría).

1.6.2 Variable dependiente (V.D)

- Y1: Stock de mineral, rampa
 - Estabilidad de la rampa y el stock.
 - Capacidad de carga del terreno.
 - Riesgo de asentamientos y fallas geotécnicas.

Tabla 1

Matriz de consistencia

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
¿En qué medida un mal estudio geotécnico de la fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial, incide en la inestabilidad e inseguridad en la construcción de un stock de mineral?	Evaluar las condiciones geotécnicas de la fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial para determinar la viabilidad y seguridad de la construcción de un stock de mineral, asegurando su estabilidad estructural y minimizando los riesgos de falla.	Si se realiza un análisis geotécnico detallado del terreno y se implementan medidas de estabilización adecuadas, permitirá construir el stock de mineral sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del área.	Independiente X1: Geotécnico	Propiedades geotécnicas (resistencia al corte, cohesión, compacidad, granulometría).
			Dependiente Y1: Stock de mineral, rampa	Estabilidad de la rampa y el stock. Capacidad de carga del terreno. Riesgo de asentamientos y fallas geotécnicas.

.Fuente: Elaboración propia

1.7 Antecedentes referenciales

1.7.1 Antecedentes internacionales

Hermosilla, D. (2021) "Caracterización geológica-geotécnica de la zona de implantación del Embalse Livilcar, Valle de Azapa, Región de Arica y Parinacota, Chile". Este estudio se centra en la caracterización geológica y geotécnica del sitio propuesto para el Embalse Livilcar, ubicado en el Valle de Azapa. Se realizaron 17 sondajes exploratorios, totalizando 770 metros perforados, junto con ensayos de permeabilidad Lugeon y Lefranc. Los resultados indicaron que las rocas presentes, principalmente andesitas y dacitas, exhiben una calidad geotécnica variable, desde mala hasta buena, con permeabilidades

que oscilan entre 0,1 y 10 unidades Lugeon. Se identificaron fallas geológicas en las laderas norte y sur de la presa, aunque sin actividad reciente que comprometa significativamente la obra.

Oyarzo, M. (2018) “Estudio Geológico y Geotécnico de diseño del embalse Valle Hermoso, Región de Coquimbo, Chile”. La investigación aborda los estudios geológicos y geotécnicos para el diseño del Embalse Valle Hermoso, situado en el sector El Paso del Buey, en el Río Pama. Se llevaron a cabo 14 perforaciones y 101 ensayos de permeabilidad Lugeon. La clasificación geotécnica de las rocas, basada en el método Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, reveló que la calidad de la roca varía entre clase III y II, indicando una calidad de roca de regular a buena. Además, se determinó que la roca es generalmente impermeable. El estudio de riesgo geológico señaló una alta actividad sísmica en la zona, aunque la mayoría de los sismos registrados presentan magnitudes entre 3,5 y 4 en la escala de Richter.

1.7.2 Antecedentes nacionales

Ccahuata, J. et al (2023) “Evaluación geológica y geotécnica para el emplazamiento de la Presa Aruri – Chumbivilcas, Cusco 2022”. La investigación se llevó a cabo en la provincia de Chumbivilcas, Cusco, con el objetivo de evaluar las características geológicas y parámetros geotécnicos para la construcción de la Presa Aruri. Se identificó que el área del embalse es de origen circo glaciar con estructura simple, incluyendo morrenas del cuaternario y rocas intrusivas del batolito de Apurímac como basamento rocoso. Los parámetros geotécnicos mostraron variaciones en la permeabilidad de la cimentación de la presa y una capacidad portante adecuada para la construcción de la misma.

Chirinos, J. et al (2023) “Estudio geotécnico para la construcción de la represa de almacenaje de agua en Huayllumayo, Espinar - Cuzco”. Este estudio se realizó en la laguna Huayllumayo, ubicada en la parte alta del distrito de Espinar, Cuzco. El objetivo fue determinar la geología local y las propiedades geotécnicas para el represamiento de agua. Se llevaron a cabo trabajos de campo que incluyeron levantamientos topográficos, litológicos, geológicos y geodinámicos, así como perforaciones diamantinas, excavaciones

de calicatas y análisis de laboratorio de suelos. Los parámetros geotécnicos obtenidos proporcionaron información esencial para el diseño de la presa, asegurando su estabilidad y funcionalidad.

Llanos, J. (2013) "Estudio Geológico-Geotécnico de la presa de tierra Cotachaca, distrito Crucero – Carabaya". Este estudio se centró en la caracterización geológica y geotécnica para la construcción de una presa de tierra en Cotachaca, distrito de Crucero, Carabaya. Se identificaron afloramientos rocosos del Grupo Copacabana, compuestos por calizas grises con óxidos de hierro, y depósitos cuaternarios como coluviales, fluvio-aluviales y bofedales. Las evaluaciones geomecánicas determinaron una capacidad portante adecuada en los estribos de la presa, recomendando la extracción de roca fracturada hasta alcanzar roca intacta para las cimentaciones.

Prado, F. et al (2015) "Estudio geológico - geotécnico para construcción de la presa Quillca, Alto Pichigua, Espinar, Cusco". El proyecto está ubicado en la microcuenca Alcamarina, en el distrito de Alto Pichigua, provincia de Espinar, Cusco. Se trata de un valle glaciar en forma de "U", alimentado por acuíferos y escorrentía de lluvias entre octubre y abril. Geológicamente, la zona se asienta sobre rocas volcánicas de la formación Orcopampa, cubiertas por materiales recientes y pleistocénicos de poco espesor. Se realizaron estudios geofísicos, como sondeos eléctricos verticales y refracción sísmica, para evaluar la potencia del material de cobertura y el basamento rocoso. La evaluación hidrológica analizó el balance hídrico de la microcuenca, proporcionando datos para la fase de diseño del proyecto. En el área geotécnica, se abordaron aspectos como clasificación del macizo rocoso, discontinuidades, RQD y RMR, además del cálculo de la capacidad portante para definir la cimentación del dique. También se identificaron zonas de aprovisionamiento de materiales para su construcción.

Quisocala, S. (2013) "Evaluación geológica y geotécnica para la construcción de la presa de tierra en la laguna Palccaccota". Este estudio se llevó a cabo en la Región Cusco, provincia de Espinar, distrito de Pallpata, en la laguna de Palccaccota. La investigación se centró en evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio destinado a la

construcción de diques y un embalse con una capacidad de almacenamiento de 8,886,925 m³, destinado a la irrigación de cultivos y consumo humano. Se realizaron trabajos de exploración geológica y geotécnica, incluyendo mapeo geológico local, prospección geotécnica, excavación de calicatas, ensayos de permeabilidad in situ, ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) y pruebas de laboratorio. Los resultados indicaron la presencia de afloramientos de rocas sedimentarias, areniscas cuarcíticas del grupo Puno con alto contenido de cuarzo, y depósitos de material suelto. Las condiciones geotécnicas revelaron materiales como limos inorgánicos de baja plasticidad y arenas arcillosas, con permeabilidades medias de 1.67×10^{-4} cm/s y bajas de 1.81×10^{-5} cm/s.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Geotecnia y mecánica de suelos y rocas*

La geotecnia es una rama de la ingeniería civil y minera que estudia el comportamiento de los suelos y rocas en respuesta a cargas y esfuerzos, con el fin de garantizar la estabilidad y seguridad de estructuras construidas sobre o dentro de ellos. En el contexto de la construcción de rampas y stock sobre una laguna de origen fluvioglacial, es fundamental comprender las propiedades físico-mecánicas del terreno para evitar asentamientos, fallas de taludes y problemas de filtración.

(Fuente: Das et al, 2018).

2.1.1.1 Definición y aplicación de la geotecnia en minería. La geotecnia minera se centra en la evaluación de la estabilidad del terreno para el diseño de estructuras como rampas, botaderos, pilas de lixiviación y presas de relaves.

Su aplicación permite:

- Evaluar la capacidad portante del suelo y la estabilidad de taludes.
- Diseñar cimentaciones y sistemas de drenaje adecuados.
- Prevenir riesgos geotécnicos como asentamientos diferenciales, licuación de suelos y fallas estructurales.

2.1.1.2 Propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas. El análisis de las propiedades geotécnicas del suelo y roca es esencial para determinar su comportamiento bajo cargas y su interacción con el agua presente en la laguna.

Propiedades físicas:

- Granulometría: Distribución de tamaños de partículas en el suelo, determinante en su permeabilidad y compactación.
- Densidad y Peso Específico: Influye en la estabilidad de la estructura a construir.
- Porosidad y Permeabilidad: Factores clave en el control de filtraciones y estabilidad de taludes.

Propiedades Mecánicas:

- Resistencia al Corte: Capacidad del suelo y roca para resistir deslizamientos. Se analiza mediante ensayos triaxiales y de compresión directa.
- Compresibilidad: Tendencia del suelo a reducir su volumen bajo carga, importante para prever asentamientos diferenciales.
- Módulo de Elasticidad y Poisson: Determina la deformabilidad del suelo y su capacidad de recuperación tras esfuerzos.

2.1.1.3 Capacidad portante del suelo y estabilidad de taludes. La capacidad portante es la máxima carga que un suelo puede soportar sin sufrir fallas. Para evaluar la viabilidad de construcción de una rampa sobre la laguna fluvioglacial, se deben realizar ensayos de campo y laboratorio, como:

- Ensayo de penetración estándar (SPT): Determina la resistencia del suelo en profundidad.
- Ensayo de placa de carga: Evalúa la deformabilidad y capacidad de carga superficial.
- Modelado numérico: Predice el comportamiento del suelo bajo la carga de la rampa y el stock.

La estabilidad de taludes es otro aspecto crítico, ya que en áreas húmedas y con suelos saturados, pueden presentarse deslizamientos. Se deben emplear métodos de análisis como:

- Método de equilibrio límite: Evalúa la estabilidad mediante el análisis de esfuerzos y fuerzas actuantes en un talud.
- Método de elementos finitos: Simula el comportamiento del suelo bajo condiciones de carga y presencia de agua.

(Fuente: Das et al, 2018).

2.1.2 Lagunas de origen fluvioglacial

Las lagunas de origen fluvioglacial son cuerpos de agua formados por la acción combinada de los glaciares y la dinámica fluvial. Estas lagunas se caracterizan por su

composición sedimentaria y por la presencia de materiales finos y sueltos, lo que puede representar un desafío geotécnico para la construcción de estructuras como rampas y stocks.

(Fuente: Evans et al, 2021)

2.2.1.1 Formación y características de las lagunas fluvioglaciares. Las lagunas fluvioglaciares se forman cuando los glaciares retroceden y dejan depresiones en la superficie, las cuales posteriormente son ocupadas por agua de deshielo o escorrentía. Los principales procesos involucrados en su formación incluyen:

- Erosión glaciar: Los glaciares desgastan el terreno subyacente, generando valles en forma de "U".
- Depósitos morrénicos: Materiales arrastrados por el glaciar se acumulan en su frente y bordes, formando barreras naturales que retienen agua.
- Drenaje fluvioglacial: Los ríos derivados del deshielo transportan sedimentos y contribuyen a la formación de la laguna.

Características Geotécnicas Relevantes

- Suelos saturados y de baja resistencia: Los sedimentos depositados en la laguna suelen ser arcillas, limos y arenas finas, con baja capacidad portante.
- Presencia de capas de turba o materia orgánica: Estas capas pueden generar asentamientos diferenciales y afectar la estabilidad de la rampa o el stock.
- Nivel freático alto: La presencia constante de agua en el subsuelo puede provocar problemas de filtración y licuación de suelos.

2.1.2.2 Composición sedimentaria y estabilidad de sus márgenes. La composición del suelo en una laguna fluvioglacial varía dependiendo de los aportes de sedimentos y del grado de compactación de los materiales. Las capas más comunes incluyen:

- Depósitos lacustres finos: Arcillas y limos de baja permeabilidad que pueden ser susceptibles a asentamientos.

- Gravas y arenas fluvioglaciares: Materiales más compactos que pueden proporcionar cierta estabilidad estructural.
- Bloques y cantos rodados: Restos de la erosión glacial que pueden encontrarse en zonas más consolidadas.

Los márgenes de estas lagunas suelen presentar problemas de estabilidad debido:

- Erosión lateral por acción del agua y esorrentía.
- Desprendimiento de material por saturación del suelo.
- Inestabilidad de taludes naturales o artificiales.

2.1.2.3 Riesgos geotécnicos asociados a la construcción en estos terrenos.

La construcción sobre una laguna fluvioglacial presenta varios riesgos que deben ser evaluados antes de iniciar el proyecto:

2.1.2.3.1 Filtraciones de agua y pérdida de estabilidad.

- La presencia de un nivel freático alto puede generar filtraciones hacia la base de la rampa o el stock, reduciendo la resistencia del suelo y aumentando el riesgo de hundimiento.
- El diseño debe incluir sistemas de drenaje adecuados para evitar acumulaciones de agua en la base de la estructura.

2.1.2.3.2 Asentamientos diferenciales.

- Debido a la heterogeneidad del suelo y su contenido de humedad, las estructuras pueden experimentar asentamientos irregulares, lo que afectaría su funcionalidad y seguridad.
- Se recomienda realizar estudios de compactación y consolidación del suelo para predecir y mitigar estos efectos.

2.1.2.3.3 Licuación de suelos.

- En presencia de cargas dinámicas (como el tráfico de camiones) y en suelos saturados, puede ocurrir la licuación, donde el suelo pierde su capacidad de carga y se comporta como un líquido.

- Para evitar esto, se pueden implementar técnicas de compactación, drenaje y cimentaciones profundas.

2.1.2.3.4 Riesgo de deslizamientos en los márgenes.

- La construcción de una rampa en la laguna puede alterar la estabilidad de sus bordes, generando deslizamientos o colapsos de material.
- Se debe realizar un análisis de estabilidad de taludes y utilizar refuerzos estructurales si es necesario.

(Fuente: Evans et al, 2021)

2.1.3 Estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes es un aspecto crítico en la construcción de rampas y stocks sobre una laguna fluvioglacial, debido a la presencia de suelos saturados, la variabilidad en la resistencia de los materiales y los efectos de la carga inducida por la construcción y operación minera.

Un análisis detallado de la estabilidad de taludes permite identificar y mitigar riesgos de deslizamientos, colapsos o erosión, asegurando la seguridad y funcionalidad de la infraestructura.

(Fuente: Terzaghi et al, 1996).

2.1.3.1 Factores que afectan la estabilidad de taludes. Existen múltiples factores que influyen en la estabilidad de un talud, los cuales pueden agruparse en tres categorías principales:

2.1.3.1.1 Factores geológicos y geotécnicos.

- Litología y estructura geológica: La presencia de capas de diferentes materiales, fracturas, fallas y zonas de debilidad en el macizo rocoso influye en la estabilidad.
- Resistencia del suelo y roca: Parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la permeabilidad determinan la capacidad del material para soportar esfuerzos sin fallar.
- Saturación del suelo: Un alto contenido de agua reduce la resistencia al corte de los materiales, aumentando el riesgo de deslizamientos.

2.1.3.1.2 Factores hidrológicos y climáticos.

- Presión de poros: La acumulación de agua dentro del suelo reduce su capacidad de carga y favorece la inestabilidad.
- Erosión y socavación: La acción del agua sobre los taludes puede provocar desprendimientos y pérdida progresiva de material.
- Precipitaciones y deshielo: El aumento estacional del nivel de agua en la laguna puede saturar los suelos, generando inestabilidad.

2.1.3.1.3 Factores antrópicos (Inducidos por la actividad humana).

- Carga adicional: La construcción de la rampa y el stock introduce nuevas cargas sobre el suelo, afectando su estabilidad.
- Excavaciones y cortes: Modificaciones en la topografía pueden alterar el equilibrio natural del talud y provocar fallas.
- Vibraciones y tráfico pesado: La operación de maquinaria y el tránsito de camiones pueden generar esfuerzos dinámicos que debilitan la estructura del suelo y provocan inestabilidad.

2.1.3.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes. Para evaluar la estabilidad de los taludes en la zona de construcción de la rampa y el stock, se emplean diferentes métodos de análisis, los cuales pueden ser empíricos, analíticos o numéricos.

2.1.3.2.1 Métodos de Equilibrio Límite (MEL). Estos métodos analizan las fuerzas actuantes sobre un talud en equilibrio y determinan si el factor de seguridad (FS) es adecuado.

Algunos de los más utilizados son:

- Método de Bishop: Considera las fuerzas de corte y normales en superficies de falla circulares.
- Método de Janbu: Se utiliza para taludes con geometría y estratigrafía más complejas.
- Método de Morgenstern-Price: Permite evaluar taludes con superficies de falla no circulares y con presencia de agua.

2.1.3.2.2 Métodos numéricos (Elementos finitos y diferencias finitas). Los métodos numéricos permiten modelar el comportamiento del suelo y la roca bajo diferentes condiciones de carga y presencia de agua.

- Método de Elementos Finitos (FEM): Simula deformaciones y esfuerzos en el talud considerando diferentes condiciones geotécnicas.
- Método de Diferencias Finitas (FDM): Se utiliza para evaluar el desplazamiento y la evolución de fallas en el tiempo.

2.1.3.2.3 Métodos empíricos y observacionales.

- Clasificación de taludes en macizos rocosos: Se usan sistemas como el RMR (Rock Mass Rating) o el SMR (Slope Mass Rating) para evaluar la estabilidad del macizo rocoso.
- Monitoreo geotécnico: Se emplean inclinómetros, piezómetros y estaciones de medición para detectar desplazamientos o cambios en la presión del agua en el suelo.

(Fuente: Bishop, 1955).

2.1.4 Ensayos geotécnicos

2.1.4.1 Muestreo con posteadora manual. El muestreo con posteadora manual es una técnica empleada en estudios geotécnicos para obtener muestras de suelo a profundidades moderadas, generalmente entre 1.5 y 3 metros. Se utiliza una herramienta portátil denominada posteadora, que permite perforar el terreno y extraer muestras representativas, ya sean alteradas o inalteradas. Este método es ideal para suelos blandos a medianamente compactos, como arcillas, limos y arenas, y se aplica en estudios de estabilidad de suelos, caracterización geotécnica y evaluación del nivel freático (Wyllie & Mah, 2004).

Dada su facilidad de uso y bajo costo, el muestreo con posteadora manual es una opción eficaz en estudios preliminares donde no se requiere maquinaria pesada. Es comúnmente utilizado para analizar la capacidad portante del suelo, definir perfiles estratigráficos y seleccionar materiales para cimentaciones. Sin embargo, su alcance es

limitado en terrenos con alta compactación o presencia de rocas, donde se requieren métodos de perforación más avanzados.

(Fuente: Terzaghi et al, 1996).

2.1.4.2 Ensayos de Penetración Dinámica Ligera DPL. El Ensayo de Penetración Dinámica Ligera (DPL, por sus siglas en inglés: Dynamic Probing Light) es un método in situ utilizado en estudios geotécnicos para determinar la resistencia del suelo a la penetración. Consiste en la hincada de una varilla metálica con una punta cónica estandarizada mediante golpes de un martillo de masa reducida, registrando el número de golpes necesarios para alcanzar determinadas profundidades.

Este ensayo es ampliamente empleado para evaluar la capacidad portante del suelo, la compactación de estratos superficiales y la variabilidad del subsuelo en terrenos de baja resistencia. Es una técnica rápida, económica y no invasiva que proporciona información preliminar para el diseño de cimentaciones superficiales, estabilidad de taludes y construcción de estructuras livianas

(Fuente: ISO 22476-2, 2005; Wyllie et al, 2004).

2.1.4.3 Ensayos de densidad de campo. Los ensayos de densidad de campo son métodos utilizados en geotecnia para determinar la densidad y el grado de compactación de un suelo en su estado natural o después de procesos de compactación. Su importancia radica en evaluar si un suelo cumple con los requisitos de diseño para cimentaciones, terraplenes, carreteras y otras estructuras.

Existen varios métodos para medir la densidad en campo, entre los más utilizados están el método del cono de arena (ASTM D1556), el método del balón de caucho (ASTM D2167) y el método nuclear (ASTM D6938).

Estos ensayos permiten comparar la densidad obtenida con la densidad máxima de laboratorio, determinada mediante ensayos Proctor, para verificar el nivel de compactación del suelo.

(Fuente: Das, 2011; ASTM, 2020).

2.1.5 Ensayos geofísicos

2.1.5.1 Ensayos de refracción sísmica. El ensayo de refracción sísmica es un método geofísico empleado en estudios geotécnicos para caracterizar la estructura del subsuelo mediante la propagación de ondas sísmicas.

Se basa en la medición de los tiempos de llegada de ondas P (primarias) y S (secundarias) a un conjunto de geófonos colocados en la superficie del terreno. La velocidad de propagación de estas ondas permite inferir las propiedades mecánicas y estratigráficas del suelo y la roca subyacente.

Este ensayo es ampliamente utilizado para determinar la profundidad del basamento rocoso, identificar zonas de fracturas o fallas geológicas y evaluar la compactación de los suelos. Su aplicación es clave en proyectos de cimentaciones, estabilidad de taludes y diseño de infraestructuras en suelos de baja resistencia. Además, es un método no invasivo que proporciona información detallada sin alterar significativamente el terreno.

(Fuente: Sheriff et al, 1995; ASTM D5777, 2018).

2.1.5.2 Ensayos MASW. El ensayo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) es un método geofísico utilizado en estudios geotécnicos para determinar las propiedades dinámicas del subsuelo mediante el análisis de ondas superficiales, principalmente ondas Rayleigh. Se basa en la medición de la dispersión de estas ondas a diferentes frecuencias a través de una serie de geófonos dispuestos en línea sobre el terreno.

Este método permite obtener perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) con profundidad, lo que es fundamental para la clasificación de suelos según normas sísmicas, la evaluación de la estabilidad de taludes y la caracterización geotécnica del subsuelo sin necesidad de perforaciones.

Su ventaja principal radica en su capacidad para evaluar grandes áreas de manera no invasiva y con alta resolución en la estratigrafía del suelo.

(Fuente: Park et al, 1999; ASTM D7848, 2018).

2.1.6 Ensayos de laboratorio

2.1.6.1 Ensayos estándar. Los ensayos estándar en geotecnia son pruebas reguladas por normativas internacionales que permiten evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo y la roca para el diseño y construcción de infraestructuras. Entre los más utilizados se encuentran el Ensayo de Penetración Estándar (SPT, ASTM D1586), empleado para determinar la resistencia del suelo mediante la hincada de un muestreador estándar; el Ensayo de Corte Directo (ASTM D3080), que mide la resistencia al corte del suelo; y el Ensayo de Consolidación (ASTM D2435), utilizado para evaluar la compresibilidad y asentamientos. Además, los Ensayos de Compactación (Proctor, ASTM D698 y D1557) permiten verificar el grado de compactación del suelo, mientras que los Ensayos Triaxiales (ASTM D4767) analizan la resistencia y comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga.

(Fuente: Das, 2011; ASTM, 2020).

2.1.6.2 Ensayos de gravedad específica de sólidos. El ensayo de gravedad específica de sólidos es una prueba de laboratorio utilizada en geotecnia para determinar la relación entre el peso de un volumen dado de partículas sólidas secas y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura estándar. Se emplea principalmente en la clasificación y caracterización de suelos, ya que influye en parámetros como la porosidad, la permeabilidad y la compacidad. Este ensayo se realiza siguiendo normativas como la ASTM D854 para suelos de grano fino y la ASTM C127 para agregados gruesos, utilizando un picnómetro, un matraz de Le Chatelier o un frasco de gasometría para medir con precisión el volumen desplazado por las partículas sólidas.

(Fuente: Das, 2011; ASTM, 2020).

2.1.6.3 Ensayos de corte directo. El ensayo de corte directo es una prueba de laboratorio utilizada en geotecnia para determinar la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones controladas de carga normal. Se realiza colocando una muestra de suelo en una caja de corte dividida en dos mitades, aplicando una carga vertical y desplazando horizontalmente la parte superior hasta inducir la falla. Este ensayo, regulado por la norma

ASTM D3080, permite obtener parámetros clave como la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes, diseño de cimentaciones y estructuras de contención

(Fuente: Das, 2011; ASTM, 2020).

2.1.6.4 Ensayos de compresión triaxial. El ensayo de compresión triaxial es una prueba de laboratorio utilizada en geotecnia para evaluar la resistencia y el comportamiento mecánico de un suelo bajo diferentes condiciones de carga y confinamiento. Se realiza colocando una muestra cilíndrica de suelo dentro de una cámara triaxial, donde se aplica una presión confinante y un esfuerzo axial hasta la falla. Dependiendo de las condiciones de drenaje, el ensayo puede ser no consolidado no drenado (UU), consolidado no drenado (CU) o consolidado drenado (CD), siguiendo la norma ASTM D4767. Los resultados permiten determinar parámetros esenciales como la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (ϕ) y la resistencia al esfuerzo cortante, siendo clave en el diseño de cimentaciones, estabilidad de taludes y presas de tierra.

(Fuente: Das, 2011; ASTM, 2020).

2.2 Marco conceptual

Geotecnia:

Rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los suelos y rocas en relación con el diseño y construcción de estructuras.

Talud:

Superficie inclinada del terreno que puede ser natural o artificial, cuya estabilidad es fundamental en obras geotécnicas.

Cimentación:

Elemento estructural que transmite las cargas de una construcción al suelo de manera segura y estable.

Resistencia:

Capacidad de un material para soportar esfuerzos sin experimentar fallas o deformaciones excesivas.

Estabilidad:

Capacidad de una estructura o suelo para mantenerse en equilibrio sin sufrir deslizamientos o colapsos.

Cohesión:

Fuerza interna del suelo que mantiene unidas sus partículas, influenciando su resistencia al corte.

Fricción:

Resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto, esencial en la estabilidad de suelos granulares.

Desmonte:

Material removido de una excavación o tajo minero, compuesto por suelo y roca no aprovechable.

Enrocado:

Capa de rocas gruesas utilizada para estabilizar taludes, cimentaciones o estructuras de contención.

Basamento:

Estrato de roca firme sobre el cual se apoyan estructuras o capas de suelo más superficiales.

Fundación:

Parte de una estructura que transfiere sus cargas al suelo, garantizando estabilidad y seguridad.

Sedimentos:

Materiales sólidos transportados y depositados por agentes naturales como agua, viento o hielo.

Permeabilidad:

Capacidad de un suelo o roca para permitir el paso de agua a través de sus poros o fisuras.

Consolidación:

Proceso de reducción del volumen del suelo debido a la expulsión de agua de sus poros bajo carga sostenida.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 *Unidad de estudio*

La rampa Copaycocha se encuentra emplazada sobre la laguna Copaycocha, la cual está situada dentro de la Unidad Minera Toromocho, una de las principales operaciones mineras del Distrito de Morococha, en la provincia de Yauli, Departamento de Junín, Perú.

Figura 3

Ubicación de rampa de acarreo cerca de laguna Copaycocha



Fuente: Google Earth

3.1.1.1 Geología regional

3.1.1.1.1 Geomorfología

Regionalmente se han definido dos unidades de relieve regional, las cuales son: Zona de altas cumbres; y Vestigios de la Superficie Puna.

Vestigios de la Superficie Puna

Los vestigios de la Superficie Puna, en el área de estudio, se caracterizan por altiplanicies y cadenas de cerros con cimas truncadas por la erosión y se extiende a través del Altiplano así como en la Divisoria Continental y en el Flanco Occidental Andino.

La “Superficie Puna” del área de estudio corresponde la etapa de erosión ocurrido en el Mio-Plioceno, es decir, después del emplazamiento de los plutones que la serie volcánica y sedimentaria volcánica del Terciario, fuera plegada.

Durante esta época la región estuvo sometida a intensa denudación por acción de procesos y agentes geomorfológicos externos en combinación con la última fase tectónica de movimientos epirogénicos. Como consecuencia se formó una superficie de erosión madura probablemente a una altitud moderada con respecto al nivel del mar, pero por el proceso de levantamiento de los Andes fue elevada hasta la altitud actual que ocupa el “Edificio Andino”. Finalmente en el curso del Cuaternario ha sido denudada y disectada por agentes geomorfológicos de tipo glaciar, fluvio-glaciar, etc., pero las altiplanicies y la concordancia de sus cúspides son un indicio para reconocerla.

Zona de Altas Cumbres

Corresponde a la parte más alta de la Cordillera Occidental, donde la Divisoria Continental es el rasgo topográfico dominante. Constituye una muralla continua de cerros suaves y abruptos de típico modelado glaciar y algunos con restos de nieve perpetua con altitudes que varían entre 4,800 y 5,400 m.

Junto a la Divisoria Continental hay un conjunto de lagunas glaciares que constituyen las nacientes de los ríos que drenan hacia el Pacífico y hacia el Atlántico.

3.1.1.1.2 Lito-estratigrafía.

Devónico- Grupo Cabanillas

Unidad Estratigráfica mayor más antigua que aflora en la zona de estudio, el Grupo Cabanillas está representado por las rocas más antiguas; que consiste en lutitas pizarrosas, filitas negruzcas y areniscas esquistosas finamente estratificadas.

Las rocas del Grupo Cabanillas presentan los efectos de intenso plegamiento y fracturamiento, debido a la acción de la orogénesis Hercínica, además toda la secuencia posterior reposa en disconformidad.

Pérmico- Grupo Mitu

Unidad Estratigráfica mayor. Está representado por un miembro de rocas clásticas rojizas de facies continental, tales como areniscas, conglomerados y brecha volcánica y por un miembro superior de rocas volcánicas.

Cretáceo Inferior-Fm Goyllarisquizga

Unidad Estratigráfica mayor, que constituye una secuencia de areniscas de color pardo amarillento con algunas intercalaciones de cuarcitas y lutitas grises y rojizas que afloran en el área de estudio.

La secuencia del Grupo Goyllarisquizga está expuesta al norte, noreste y sureste de Morococha; en esta área destacan derrames o diques de diabasa y basalto; algunos de los cuales han sido mapeados.

Cretáceo Inferior – Formación Chulec

Unidad Estratigráfica mayor, conformada por calizas grises con capas medianas que se intercalan con niveles de capas delgadas, de 5 a 30 cm, y con capas gruesas ocasionalmente se intercalan calizas margosas y margas color pardo grisáceo.

Cretáceo Inferior - Formación Pariatambo

Unidad Estratigráfica mayor, conformada por calizas y margas bituminosas de color negruzco e intercalan calizas oscuras en capas delgadas con tendencia a desprenderse en forma de lajas; tiene horizontes con bastante Oxytropidoceras.

Cretáceo Superior – Formación Jumasha

Unidad Estratigráfica mayor, conformada por calizas grises y gris amarillentas, estratificadas en capas medianas y gruesas, donde se encontraron restos de fósiles mal conservados

Cretáceo Superior - Formación Casapalca

Unidad Estratigráfica mayor, que constituye una gruesa secuencia de rocas clásticas, rojizas, se exponen en una franja que se observa a lo largo de la parte alta de la Cordillera Occidental.

Paleoceno – Formación Carlos Francisco

Unidad Estratigráfica mayor, conformada por una gruesa secuencia de rocas volcánico-sedimentaria que yace, en aparente concordancia, sobre la formación Casapalca.

Miembro Tablachaca

Este miembro consiste en una secuencia de conglomerado con elementos volcánicos de 5 a 10 cm. de diámetro y en menor proporción gravas y cantos hasta de 50 cm. con matriz areno-limosa se intercalan areniscas, limolitas rojizas y calizas arenosas.

Miembro Carlos Francisco

En las mismas localidades indicadas anteriormente destaca morfológicamente un conjunto de derrames andesíticos porfiroides y afaníticos de color gris y por intemperismo verdoso y violáceo; intercalan ocasionalmente flujos de brecha volcánica y pórfidos masivos que dan el aspecto local de cuerpos hipabisales.

Miembro Yauliyacu

Este miembro se caracteriza por tobas rojizas con algunas intercalaciones de tobas lapillíticas gris verdosa, y marrones; ocasionalmente se presentan capas de andesitas, limolitas y areniscas tobáceas.

Plioceno – Volcánico Pocacocha (N-g)

Unidad Estratigráfica mayor, formada derrames volcánicos andesíticos y basálticos con algunas intercalaciones de flujos de brecha volcánica y andesita tobáceas.

Cuaternario – Deposito aluvial (Q-al)

Unidad Estratigráfica mayor. Estos depósitos son producto de los cauces actuales de los ríos y quebradas, se tratan de gravas y arenas gruesas, también están conformadas por escombros de talud que descienden de las paredes de los valles también podemos

apreciar material fluvioglaciario. Acarreado por los ríos de ambas vertientes de la zona andina en estudio; esto guarda relación con el proceso erosivo activado por el sensible levantamiento andino y las etapas de glaciación.

3.1.1.1.3 Rocas Intrusivas. Las rocas intrusivas que afloran en la región estudiada, corresponden a cuerpos emplazados en diferentes épocas. Cuerpos marginales, emplazados al este del batolito y distribuidos a lo largo de una faja en la parte media del Flanco Occidental Andino.

En la zona alta de la Cordillera Occidental se presentan grupos de intrusiones menores de facies hipabisales, distribuidos aisladamente a lo largo de toda la Cordillera Occidental.

Cada grupo se caracteriza por unidades intrusivas menores que varían en composición de básicas a ácidas, pues se ha reconocido diorita, tonalita, granodiorita, monzonita, también cuerpos de riódacita y andesita. De los grupos de intrusiones menores reconocidos en el área de estudio se pueden resumir los siguientes:

Grupo de Huamparcocha-Paticocha

Aflora al norte de San Mateo, en el sector NO de la hoja de Matucana. Las unidades reconocidas son: diorita, tonalita, monzonita granodiorita, andesita y riódacita.

Grupo Colqui-Huasa

Aflora entre la mina Colqui, y el túnel trasandino en el sector NO de la hoja de Matucana. Comprende cuerpos de diorita, granito y andesita.

Grupo de Morococha

Aflora en el área de Ticlio-Morococha en el sector NE de la hoja de Matucana. Está integrada por unidades de diorita, monzonita, andesita y traquiandesitas.

Sub-Grupo de Pomacocha-Casapalca

Aflora entre ambas localidades, al NE de la hoja de Matucana. Comprende cuerpos pequeños, hipabisales y silla de diorita, tonalita, andesita.

Grupo de Azulcocha

Aflora en el área de la laguna Azulcocha y nevados de Collquepucro, en el ángulo SE de la hoja de Matucana. Comprende pequeños cuerpos de diorita y un stock de granodiorita que intruyen a roca calcárea del Cretáceo.

Figura 4

Columna estratigráfica regional

LEYENDA					
ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		ROCAS INTRUSIVAS
			SECTOR OCCIDENTAL	SECTOR ORIENTAL	
CENOZOICO	CUATERNARIO		Q-al DEPÓSITO ALUVIAL		CUARZO, MONZONITA, PORFIRITICA CZMP TONALITA T-to DIORITA T-di ANDESITA T-an
		PLIOCENO	N-p VOLC. POCACOCHA		
		PALEOCENO	P-cf FM. CARLOS FRANCISCO		
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Kp-ca FM. CASAPALCA		
			Ks-j FM. JUMASHA		
		INFERIOR	Ki-pt FM. PARIATAMBO		
			Ki-ch FM. CHULEC		
			Ki-g FM. GOYLLARISQUIZGA		
PALEOSOICO	PERMICO	Psti-mi GRUPO. MITU			
	DEVONICO	D-c GRUPO. CABANILLAS			

Fuente: Chinalco

3.1.1.1.4 Geología estructural. El área de estudio, y en general de la región andina, ha sido afectada por movimientos tectónicos que han ocasionado las siguientes disconformidades:

- Entre clásticos del Cretáceo inferior y las calizas cretáceas.
- Entre las calizas cretáceas y las capas rojas Casapalca (Fase peruana).

- Entre las capas rojas Casapalca y la serie volcánico-sedimentaria del Terciario inferior (Fase Incaica)
- Entre el volcánico-sedimentario del Terciario inferior y la serie volcánico-sedimentaria del Mioceno inferior (Fase Poroche)
- Entre la serie volcánica del Mioceno y la del Plioceno inferior (Fase Quechua).

En la parte alta de la Cordillera Occidental del área de estudio, las capas rojas Casapalca yacen, en discordancia erosional, sobre las rocas calcáreas de la formación Jumasha; además dichas capas rojas están cubiertas discordantemente por la potente secuencia volcánico-sedimentaria del Terciario; en consecuencia, se reconoce en esta área, los efectos de la fase tectónica Peruana que plegó con gran radio de curvatura a las unidades formacionales mesozoica; luego por movimientos epirogénicos hubo emersión y la consiguiente deposición tipo molasa de las capas rojas Casapalca; esto ocurrió en el lapso del Cretáceo superior y principios del Terciario.

Sector del Domo de Yauli

Dentro de este rasgo morfoestructural podemos reconocer:

Plegamiento Hercínico. - Compromete a unidades del Paleozoico inferior pertenecientes al Grupo Cabanillas, cuyas estructuras corresponden a las parte marginal de la cadena, Hercínica, con pliegues visibles de dimensiones centimétricas a hectométricas cuyos ejes tienen una dirección NNO a SSE.

La litología está constituida por bancos cuarcíticos y lutáceos con pliegues apretados predominantes, sobre todo, en las pelitas.

Estructuralmente al Grupo Cabanillas está constituyendo el número de un anticlinal cerrado conocido como Domo de Yauli; soporta en sus flancos al Grupo Mitu el que a su vez ha sido traslapado, en su flanco oeste, por rocas mesozoicas (zona imbricada) debida a fallas diversas de bajo ángulo.

La fase Tardihercínica probablemente actuó con fallamientos normales levantando al Grupo Cabanillas

Plegamiento Andino. - Comprende a unidades del Paleozoico superior como el Grupo Mitu y a unidades del Mesozoico que van desde el Grupo Pucará hasta las capas rojas Casapalca. La estructura principal es el sinclinal de Chinchecocha que presenta flancos abiertos con un gran radio de curvatura.

Sector Imbricado

En este sector se presentan el Jurásico y Cretáceo muy plegados y fallados, correspondiendo a una zona imbricada propia de un nivel de deformación intermedio. Se caracteriza por pliegues apretados en chevron, con fallas inversas producto de una fuerte tectónica compresiva (Fase Incaica) donde se muestra una incipiente esquistosidad de fractura que hace suponer que este sector correspondería a una depresión axial.

Posteriormente, dichos terrenos así deformados fueron empujados hacia el noreste sobre el domo de Yauli (Fase Poroche). La orientación general de los pliegues y fallas es NO-SE.

Los fallamientos inversos y los sobre escurrimientos tienen como plano de despegue al Grupo Pucará o a las formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha en sus niveles arcillosos o bituminosos, facilitando estos despegues.

Existe además un sistema de fallas menores de ocurrencia posterior que corta a los pliegues y fallas anteriores, cuyo rumbo es NE-SO.

3.1.1.1.5 Hidrogeografía. La zona del proyecto pertenece a la región hidrográfica del amazonas.

3.1.1.2 Geología local

3.1.1.2.1 Hidrogeología. Los acuíferos subterráneos existentes de la rampa Copaycocha son los siguientes:

Acuífero Fisurado Kárstico AFK se encuentre al este del proyecto y forma el 85% de la zona del proyecto consiste de formaciones consolidadas fisuradas, incluye formaciones Kársticas.

Acuífero Poroso No Consolidado Alta APNCa son formaciones detríticas permeables en general no consolidadas con acuíferos generalmente extensos y con productividad elevada (permeabilidad elevada).

Morfología.

El área de estudio se encuentra dentro del ámbito geomorfológico de la Cordillera de los Andes.

En el marco de la zona de la rampa Copaycocha, se encuentran manifestaciones de glaciaciones recientes y modificaciones producidas por procesos periglaciares actuales. En toda el área, la mayor importancia la tienen los procesos periglaciares, como deslizamientos de derrubios, que determinan la presencia de formas menores típicas del resultado de estos procesos.

Las formas que predominan gracias a estos procesos son los grandes taludes de derrubios, los cuales tapizan las laderas con derrubios muy finos producto de la intensa meteorización mecánica que caracteriza el área.

Como se mencionó anteriormente el área de estudio denota la influencia glacial reciente, en algunas cumbres se conservan pequeños glaciares de circo.

Los depósitos de morrenas se encuentran principalmente en las laderas. La superficie del suelo en áreas de morrena presenta en la superficie un depósito tipo lag, compuesto por sedimentos caóticos, heterogéneos y heterométricos (bloques, gravas, arenas, limos y arcillas).

Litología.

La litología en la zona del proyecto está compuesta por:

- **Diorita del Grupo Morococha**

Son dioritas producto de las intrusiones ocurridas a lo largo del tiempo, están intrusiones han traído la mineralización a la zona de la mina. Son dioritas que superficialmente han sufrido meteorización. Según sus propiedades geomecánicas se puede clasificar como una roca de calidad media según Bieniawski.

- Depósitos Morrénicos

Comprende a los depósitos morrénicos antiguos a recientes que se encuentran en las cabeceras de los valles glaciares o bien cubriendo el fondo márgenes de los mismos; también se encuentran de las laderas.

- Depósitos Residual

Son producto de la meteorización y desintegración de las dioritas, calizas cercanas y depósitos morrénicos.

- Depósitos Morrénicos

Comprende a los depósitos morrénicos antiguos a recientes que se encuentran en las cabeceras de los valles glaciares o bien cubriendo el fondo márgenes de los mismos; también se encuentran de las laderas.

- Depósitos Antrópicos

Fue producto de la actividad no planificada y planificada por el hombre en que ha removido, acumulado y construido, para satisfacer necesidades en la exploración, explotación, minado y desarrollo de la actividad minera, creando infraestructura poblacional, modificando así el paisaje natural. Entre las modificaciones en el entorno se tiene: Vías de accesos, campamentos, oficinas y talleres, plantas de procesamiento, desmonteras.

3.1.1.2.2 Geodinámica externa. Los agentes externos son los responsables de la lenta y progresiva evolución a la que está sometida la superficie terrestre, con un doble papel de destructores del relieve y, al mismo tiempo, creadores de nuevas formas externas.

Existen una serie de factores que favorecen estos movimientos, son los factores condicionantes y, por otro lado, otros factores que los desencadenan, son los factores desencadenante.

Factores condicionantes encontrados en el área de estudio:

- Litológicos: Materiales meteorizados, baja cohesión y alternancia de estratos.
- Climáticas: Alternancia de épocas de sequía y lluvias.

- Hidrológicos: Escorrentía superficial, estancamiento de agua, cambios en el nivel freático y permeabilidad de los estratos.
- Topográficos: Pendientes mayores a 15°.
- Vegetación: Ausencia de vegetación.
- Factores desencadenantes encontrados en el área de estudio:
- Naturales: Cambios en el volumen del terreno.
- Inducidos: Modificación de la morfología natural.

A continuación, se describen los procesos de geodinámica externa encontrados en el área de estudio:

Caída de rocas

Básicamente todos los sectores poseen riesgo de caída de rocas, ya que la forma del relieve predominante son los taludes de derrubios con afloramientos rocosos sobre ellos.

Peligros de carácter antrópico

Son los producidos por actividades humanas que se han ido desarrollando a lo largo del tiempo. Están directamente relacionados con la actividad y el comportamiento del hombre.

En la zona objeto de estudio, la modificación del terreno natural tras los trabajos, el plataformado y las obras ingenieriles implementadas en el área han desencadenado y/o acelerado los procesos de geodinámica externa como el flujo de detritos y caídas de rocas.

3.1.2 Investigaciones geotécnicas

3.1.2.1 Muestreo con Posteadora manual. Para identificar el perfil estratigráfico del terreno y su composición, se ha previsto la realización del muestreo del terreno mediante posteadora manual.

Las excavaciones no han alcanzado mayor profundidad, debido a la presencia de material granular y nivel freático superficial.

Tabla 2*Resumen de posteadoras zona Rampa Copaycocha*

Calicata	Profundidad (m)	Nivel freático (m)	Numero de muestras alteradas	Zona
P-1-R	3.00	1.30	3	Rampa Copaycocha
P-2-R	3.00	1.50	3	
P-3-R	3.50	1.30	2	
P-4-R	3.00	1.30	2	

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2 Ensayos de Penetración Dinámica Ligera DPL. Para determinar la resistencia a la penetración, se deben contar los golpes por cada 10 cm de profundidad de penetración N10. En suelos de muy poca resistencia, en donde la penetración asciende a más de 10 cm por golpe, se debe indicar la penetración por cada golpe. Norma NTP 339.159.

Luego del registro de las mediciones correspondientes, se debe representar el resultado de penetración mediante un diagrama de niveles mediante el número de golpes N10 con la profundidad alcanzada. Los ensayos DPL, se ubicará en la superficie del terreno natural próximo a las calicatas realizadas.

Finalmente, con el número de golpes del DPL respecto de la profundidad se correlaciona con el número de golpes del ensayo SPT y se estima la compacidad y parámetros geotécnicos del suelo.

Tabla 3*Resumen de ensayos DPL*

Numero de ensayo	Profundidad (m)	Zona
DPL-1R	6.80	Rampa Copaycocha
DPL-2R	4.90	
DPL-3R	3.00	

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3 Ensayos de densidad de campo. Para determinar la densidad del material de fundación y de acopio se han ejecutado ensayos de densidad por el Método con Balón (ASTM D2167), El método consiste en colocar un cilindro de 12" de diámetro y de 5cm de espesor, en una superficie plana y nivelada, donde se determinará la densidad,

luego se procede a excavar el suelo que se encuentra dentro del cilindro hasta una profundidad igual a 20 cm; el material extraído se coloca en una bolsa para pesar y obtener su contenido de humedad en laboratorio. Seguidamente se coloca una bolsa de plástico, sujeta al cilindro dentro del agujero, y se llena de tal forma que el agua ocupe en la bolsa el volumen del agujero. Finalmente con el peso del material y el volumen del hoyo conocidos, podemos determinar la densidad de campo.

Tabla 4

Resumen de ensayos DPL

N°	Zona	Sondeo	Prof. (m)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Contenido de humedad (%)	Densidad seca (g/cm ³)
1	Rampa Copaycocha	D-1 R	0.50-0.80	1.93	2.89	1.87
2		D-2 R	0.50-0.80	1.87	5.07	1.78

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Ensayos geofísicos realizados

3.1.3.1 Ensayos de refracción sísmica. El objeto del ensayo de refracción sísmica es determinar el perfil sísmico del terreno en la fundación del eje de la Rampa Copaycocha proyectada y la zona de Ampliación del Stock W7:

- Estimar los parámetros de resistencia y deformación de los materiales que conforman el suelo.
- Determinar los perfiles sísmicos del suelo en función de sus características dinámicas y a profundidades de investigación variable, según el objetivo específico de cada línea.

La investigación geofísica se realizó entre el 02 y el 03 Febrero del 2018, en ella se ejecutaron un total 6 líneas de refracción sísmica en el área prevista para el trazo de la Rampa Copaycocha.

3.1.3.1.1 Trabajo de campo. Las líneas del ensayo de refracción sísmica se hicieron de acuerdo a una adecuada distribución en el área de estudio.

Se realizaron en total 9 líneas sísmicas, cuya ubicación se indica en el la siguiente tabla.

Tabla 5*Resumen de ensayos de refracción sísmica*

Coordenadas						
Línea	Longitud (m)	Inicio		Final		Zona
		E(m)	N(m)	E(m)	N(m)	
LS-CO-1	75	375878	8716298	375848	8716232	Rampa Copaycocha
LS-CO-2	75	375848	8716232	375831	8716160	
LS-CO-3	75	375868	8716111	375843	8716179	
LS-CO-4	75	375890	8716109	375858	8716180	
LS-CO-5	75	375868	8716111	375901	8716037	

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.1.2 Método de ensayo. El ensayo de refracción sísmica consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de compresión y de corte, ondas P, generadas por el impacto de una comba de 25 lb. Sobre el disco metálico del equipo. Estos impactos son localizados a diferentes distancias a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo, y el inicio de la grabación está dado por un dispositivo, o SWITCH, que marca el tiempo cero a partir del cual se evalúa el tiempo del recorrido.

Finalmente, la energía es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse el tiempo de arribo en cada punto y de esta manera, las velocidades de las ondas.

Estos datos de tiempo y distancia obtenidos, variando el punto de disparo o la aplicación de energía, permiten evaluar las velocidades de propagación de las ondas P a través de los diferentes suelos cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas.

Para el análisis de los datos se utilizó el método de "Delay Time" pues permite manejar criterios que utilizan la suposición de la Ley de Snell en cuanto a la reflexión y a la refracción de las ondas. Con el registro de las velocidades de las ondas P y S (VP y VS), y el debido criterio del especialista, es posible definir los cambios de densidad de los estratos, sus parámetros de deformación dinámicos y estáticos (módulo de elasticidad dinámico ED, relación de Poisson μ y módulo de elasticidad estático E) y estimar el ángulo de fricción interna Φ .

Figura 5

Esquema de distribución de shots – refracción sísmica



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.1.3 Equipo utilizado. El equipo utilizado para realizar el trabajo de Prospección Sísmica fue el sismógrafo GEODE de 24 canales; el cual posee un sistema de adquisición de datos la cual es almacenada y procesada por una computadora; este equipo tiene las siguientes características técnicas.

Tabla 6

Características del equipo de refracción sísmica

CARACTERISTICAS		VALOR NOMINAL
No de Canales		24
Resistencia de Salida		> 600 ohmios
Rango de Frecuencia		10 – 400 Hz
Filtro de Frecuencias		10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz.
Ganancia		63X (36 dB) 2%
Tiempo de Registro		64, 128, 256, 512, 1024
Tiempo de Retardo de Registro		0-999 ms.
Tiempo de Prearranque		90% duración general
Sistema de Mando		Computadora IBM AT-80386sx
Tensión de Alimentación		12 V
Potencia de Consumo		W

Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Sismógrafo GEODE de 24 canales



Fuente: Chinalco

3.1.3.1.4 Interpretación. La interpretación de los perfiles sísmicos se realizó mediante el grupo de programas PickWin y PlotRefra.

El primero de ellos permite realizar las lecturas de los sismogramas, mientras que el segundo produce un modelo de profundidad a partir del archivo de datos de entrada producido por el primero.

Así mismo, el programa calcula las velocidades de los estratos mediante la técnica de mínimos cuadrados, usa el método de tiempo de retardo para estimar las profundidades y, finalmente, ajusta las profundidades de cada estrato por efecto de la superficie topográfica.

Este último proceso se hace de forma iterativa hasta encontrar el modelo que se ajuste a la geología superficial del terreno investigado.

Tabla 7*Resultados de ensayos de refracción sísmica*

Ubicación	Línea	Estrato	VP (m/s)	Espesor (m)	Tipo de suelo (inferido)
Rampa Copaycocha	LS-CO-1	1	332	4.5	Material de limo arcilloso blando y saturado
		2	1123	11.5	Material limoso morrénico medianamente denso
		3	2108	-	Roca poco alterada
	LS-CO-2	1	389	4.0	Material de limo arcilloso blando y saturado
		2	1177	17.0	Material limoso morrénico medianamente denso
		3	2220	-	Roca poco alterada
	LS-CO-3	1	377	5.0	Material de limo arcilloso blando y saturado
		2	1172	10.0	Material limoso morrénico medianamente denso
		3	2636	-	Roca poco alterada
	LS-CO-4	1	260	3.0	Material de limo arcilloso blando y saturado
		2	1331	11.0	Material limoso morrénico medianamente denso
		3	2737	-	Roca poco alterada
	LS-CO-5	1	260	2.0	Material de limo arcilloso blando y saturado
		2	1302	9.5	Material limoso morrénico medianamente denso
		3	2752	-	Roca poco alterada

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.1.5 Evaluación de resultados. La evaluación de la refracción sísmica ha consistido en graficar líneas de la superficie basándose en la topografía superficial, indicando los puntos de localización de geófonos y los puntos de impacto. Para cada una de las líneas sísmicas se han establecido perfiles sísmicos con valores de velocidad de propagación de ondas longitudinales (ondas P), basándose en las líneas dromocrónicas calculadas a partir de los tiempos de llegada de las ondas, de donde se puede deducir lo siguiente:

El perfil sísmico Eje Rampa Copaycocha

Este perfil comprende las líneas sísmicas LS-CO-1 al LS-CO-5 de 75 m de longitud cada una, ejecutada en la zona de fundación de la Rampa Copaycocha proyectada:

El perfil sísmico presenta un suelo de cobertura blando con un espesor de hasta 5 m y con velocidad promedio de ondas Vp entre 260 m/s y 389 m/s; por debajo se encuentra material morrénico medianamente densa con velocidad de ondas Vp entre 1 123 m/s y 1

331 m/s con un espesor de hasta 17 m; y por debajo se encuentra la roca alterada con velocidad de ondas Vp entre 2 108 m/s y 2 752.

3.1.3.2 Ensayos MASW. Para obtener el perfil de velocidades de ondas S y los parámetros dinámicos del suelo fundación y la roca en el ámbito del eje de la Rampa Copaycocha, donde se ha realizado 01 ensayo de MASW.

Los objetivos principales de la utilización de este método son los siguientes:

- Determinar los perfiles estratigráficos en función a las velocidades de ondas de corte Vs.
- Determinar las características dinámicas de los estratos en función a las velocidades de las ondas de corte Vs.
- Determinar de los parámetros de deformación dinámica de los suelos.

3.1.3.2.1 Trabajos de campo. Se ejecutaron 03 líneas sísmicas empleando el método MASW, con el objetivo de determinar las velocidades de ondas de corte Vs de los distintos estratos del terreno en el sitio de cada una de las estructuras del esquema hidroeléctrico. Este ensayo fue denominado MASW-CO-1. Para producir la onda sísmica se utilizó una comba de 20 libras.

La siguiente tabla presenta el resumen de los ensayos realizados:

Tabla 8

Resumen de ensayos MASW

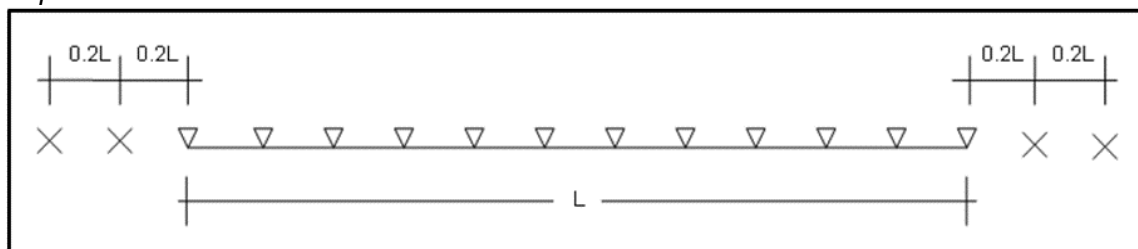
Ensayo	Longitud (m)	Coordenadas		Ubicación
		E (m)	N (m)	
MASW-CO-1	75	375857	8716142	Rampa Copaycocha

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2.2 Método de ensayo. El ensayo es similar al de refracción sísmica, consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de corte (Vs) generadas por un golpe de impacto producidas por una comba. La diferencia principal radica que para este método se emplean geófonos de 4.5Hz de frecuencia, además, los puntos de disparo se ubican a 0,2 y 0,4 L a los extremos de la línea, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 7

Esquema de distribución de shots – MASW



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2.3 Resultados obtenidos. Los resultados de este ensayo han permitido obtener la variación de las velocidades de ondas de corte (V_s) hasta una profundidad de 30,0 m. aproximadamente; El procesamiento de la información de campo se realizó por medio del programa SeisImager/SW versión 1.4. Es importante recalcar que los resultados de estos ensayos son unidimensionales, y muestran valores V_s en el centro de la línea geofísica.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9

Resultados de ensayos MASW

Cota (msnm)	MASW-CO-1 V_s (m/s)
4612.43	292.00
4611.19	232.00
4609.79	255.00
4608.23	324.00
4606.50	386.00
4604.60	444.00
4602.54	494.00
4600.31	534.00
4597.92	562.00
4595.37	575.00
4592.65	588.00
4589.76	615.00
4586.71	647.00
4583.50	788.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2.4 Parámetros dinámicos del suelo. Las técnicas sísmicas permiten obtener la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P (primarias) y de las ondas sísmicas S (secundarias). Con estos valores de velocidad de propagación de las ondas P

y S (V_p y V_s) a través del terreno, es posible calcular el Coeficiente de Poisson dinámico, el Módulo de Elasticidad Dinámico E_d , el Módulo de Corte Dinámico G_d , y el Módulo Volumétrico Dinámico K_d de los macizos rocosos.

Los resultados de los ensayos geofísicos nos arrojan valores de velocidades de propagación de ondas “S” en el terreno de fundación, las cuales se expresan de la siguiente manera:

$$V_s = \sqrt{\frac{\omega}{\rho}} \quad (1)$$

Donde:

λ y ω : Constantes de Lamé

ρ : Densidad del Suelo

De la teoría de la elasticidad, podemos expresar las constantes elásticas dinámicas de la siguiente manera:

$$E_d = 2(1 + \mu)G_d$$

$$G_d = \gamma V_s^2 \quad (2)$$

Donde:

μ : Coeficiente de Poisson

E_d : Módulo de Young para deformaciones pequeñas

G_d : Módulo de corte

γ : Densidad del suelo

Utilizando las formulaciones planteadas y los resultados obtenidos en el ensayo de Refracción Sísmica, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 10

Determinación de parámetros dinámicos

Zona	Ensayo	Profundidad (m)	V_s (m/s)	Poisson μ	G_d (KN/m ²)	E_d (KN/m ²)	E_s^* (Kg/cm ²)
Rampa Copaycocha	MASW-CO-1	4.20	230	0.20	86367	207899	106
		13.00	499	0.41	482757	1360464	694
		-	659	0.47	886288	2599777	1326

Fuente: Elaboración propia

Abreviaturas:

V_s : Velocidad de Ondas de Corte

μ : Coeficiente de Poisson

E_d : Módulo de Young para deformaciones pequeñas(dinámico)

E_s : Módulo de Young estático

G_d : Módulo de corte

*La experiencia ha demostrado que el valor del Módulo de Young dinámico es 10 a 15 veces el estático.

Por otro lado según la AASHTO 2012 la velocidad de ondas V_s a 30 m de profundidad se tiene los siguientes valores de V_{s30} y el tipo de material asignado.

Tabla 11

Valores de V_{s30}

Ensayo	V_{s30} (m/s)	Tipo de suelo	Zona
MASW-1	475	C	Rampa Copaycocha

Fuente: Elaboración propia

3.2 Procesamiento de la información

3.2.1 Ensayos de laboratorio realizados

3.2.1.1 Ensayos estándar. Con las muestras alteradas obtenidas de las excavaciones (calicatas), se realizaron ensayos estándar de clasificación de suelos y de propiedades físicas consistentes en: análisis granulométrico por tamizado y contenido de humedad.

Los ensayos se ejecutaron siguiendo las normas de la American Society For Testing and Materials (ASTM). Las normas para estos ensayos son las siguientes:

- Análisis granulométrico por tamizado ASTM D-422
- Contenido de humedad ASTM D-2216
- Clasificación SUCS ASTM D-2487

En el siguiente cuadro se presenta un resumen de los resultados de los ensayos estándar realizados.

Tabla 12*Resumen de los ensayos estándar de clasificación de suelos - Rampa Copaycocha*

Calicata / Trinchera	Muestra	Profund. (m)	Granulometría (%)			Límites (%)		C. H. (%)	Clasificación SUCS
			Grava	Arena	Finos	L.L.	L.P.		
D-1	M-1	0.00-1.00	78.3	12.1	9.7	25	21	2.31	GP-GC
D-2	M-1	0.00-1.00	61.1	19.7	19.2	32	22	1.85	GC
D-3	M-1	0.00-1.00	82.4	12.5	5.1	28	21	1.43	GP-GC
P-1-W	M-1	1.00-2.00	0.0	29.4	70.6	37	26	21.13	ML
	M-2	2.00-3.00	0.0	12.6	87.4	-	-	126.4	MH
P-2-W	M-1	1.00-2.00	0.0	2.3	97.7	-	-	129.4	MH
	M-2	3.00-4.00	0.0	21.9	78.1	29	23	54.3	ML
P-3-W	M-1	1.00-2.00	0.0	3.0	9.0	63	43	72.95	MH
	M-2	2.00-3.00	0.0	5.3	94.7	53	31	78.18	MH
	M-3	3.00-4.00	0.0	2.9	97.1	65	38	128.4	MH
	M-4	4.00-5.00	0.0	7.3	92.7	43	31	40.25	ML
P-4-W	M-1	1.00-2.00	0.0	4.1	95.9	54	31	77.9	MH
P-5-W	M-1	1.00-2.00	0.0	27.9	72.1	47	-	63.53	ML
	M-2	2.00-3.00	0.0	7.3	92.7	49	36	62.18	ML
	M-3	3.00-3.20	0.0	7.6	92.4	60	45	70.75	MH

Fuente: Elaboración propia

- L.L.: Límite líquido
- L.P.: Límite plástico
- C.H.: Contenido de humedad

3.2.1.2 Ensayos de gravedad específica de sólidos. Para determinar las propiedades físicas del material de desmonte y de la fundación se han ejecutado ensayos Gravedad Específica de Sólidos (Norma ASTM D 854).

En el siguiente Tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 13*Resumen de ensayos de gravedad específica de sólidos*

Sondaje	Muestra	Profund. (m)	SUCS	GE	Zona
D-2	M-1	0.50-0.80	GC	2.52	Rampa Copaycocha

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3 Ensayos de Corte Directo

Para estimar parámetros de resistencia del suelo se han ejecutado ensayos Corte Directo (ASTM D 4080) sobre las muestras extraídas del material de fundación y de

desmante. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados de los ensayos ejecutados:

Tabla 14

Resumen de ensayos de corte directo

Sondaje	Muestra	Profund. (m)	SUCS	C (kg/cm ²)	ϕ (°)	Zona
D-2/R	M-1	0.50-0.80	GC	0	34.61	Rampa Copaycocha
P-3/R	M-1	3.00-3.50	MH	0.15	25.87	

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4 Ensayos de compresión triaxial. Para estimar parámetros de resistencia del material de desmante se han ejecutado ensayos de Compresión Triaxial CU (ASTM C4767) con tamaño de celda 6" lo cual ha sido orientado con la finalidad de caracterizar mejor el material granular del desmante de mina.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados de los ensayos ejecutados:

Tabla 15

Resumen de los ensayos de compresión triaxial CU

Sondaje	Muestra	Profund. (m)	SUCS	C` (kg/cm ²)	ϕ (°)	C (kg/cm ²)	ϕ (°)	Zona
D-1/R	M-1	0.0-1.0	GC	0.0	40.8	0	33.1	Rampa Copaycocha
D-2/R	M-1	0.0-1.0	GC	0.0	38.9	0	32.1	

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.5 Ensayos químicos en suelos. Con el objeto de estimar el grado de agresividad del suelo se han ejecutado ensayos químicos de suelo, donde se han determinado el pH, conductividad eléctrica, sales solubles totales, cloruros y sulfatos contenidos en las muestras de suelo. Bajo las normas ASTM D 1889, ASTM D 4972/ ASTM D 1293, ASTM D 512 y ASTM D-516.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos químicos.

Tabla 16*Resumen de ensayos químicos en suelos*

Calicata / Muestra	Profundidad (m)	pH	SST (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)	Zona
P-1-R/M-2	1.00-2.00	6.8	1502	36	1326	Rampa Copaycocha
D-2-R/M-1	0.00-1.00	7.2	1820	53	870	

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presentan los límites permisibles recomendados por el Comité ACI 318- 2005 y valores recopilados de la literatura existente sobre las cantidades en partes por millón (ppm) de sulfatos, cloruros y sales solubles totales, así como el grado de alteración y las observaciones del ataque a las armaduras y al concreto, se da las recomendaciones necesarias para la protección ante el ataque químico.

Tabla 17*Resumen de valores permisibles*

Frecuencia en el suelo de:	% peso	Grado de alteración	Consecuencia
Sulfatos	0.00 – 0.10	Leve	Ocasiona un ataque químico al concreto de la cimentación
	0.10 – 0.20	Moderado	
	0.20 – 2.00	Severo	
	>2.00	Muy severo	
Cloruros	>6,0	Perjudicial	Ocasiona problemas de corrosión de armaduras o elementos metálicos.
Sales solubles totales	>1,5	Perjudicial	Ocasiona problemas de pérdida de resistencia mecánica por problema de lixiviación

Fuente: Comité ACI 318-2005

De la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y los valores recomendados se puede deducir el siguiente comportamiento. Los niveles de agresividad química en la zona de la fundación de la Rampa Copaycocha son moderados respecto a sulfatos por lo que se recomienda utilizar cemento Tipo V.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

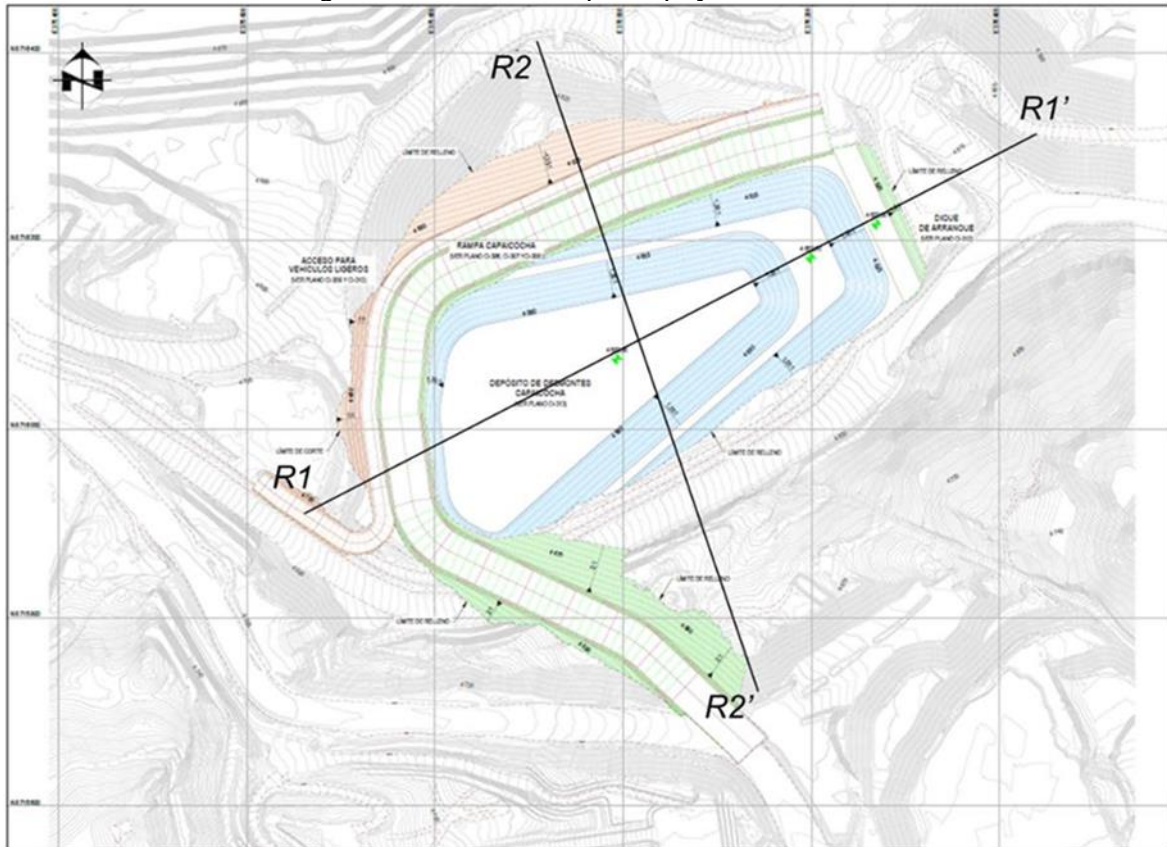
4.1 Análisis geotécnico

Para los análisis de estabilidad se emplearon las propiedades de resistencia, obtenidos a partir de los ensayos de campo y laboratorio desarrollados para la presente investigación. Los análisis de estabilidad se ejecutaron para condiciones de carga estática y pseudo-estática, siendo esta última asociada a coeficientes sísmicos desarrollado por la empresa Buenaventura Ingenieros S.A. (BISA, 2011).

De acuerdo a lo indicado por Chinalco, la rampa Copaycocha y su correspondiente depósito de desmonte son de carácter temporal, con un tiempo de exposición de 10 años y una probabilidad de excedencia de 10%, lo que representa un periodo de retorno de 100 años. Consecuentemente a partir del estudio de BISA (2011), obtiene un coeficiente sísmico de 0.18 para periodos de retorno de 100 años.

Figura 8

Ubicación de secciones geotécnicas en Rampa Copaycocha



Fuente: Chinalco

Consideraciones generales de análisis.

Los análisis fueron realizados tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se consideró que las superficies de falla pasan por el cuerpo de los depósitos, por tanto, la fundación está representada por una roca base única y elástica (de resistencia infinita);
- El nivel freático fue inferido en base a lo observado en campo, tomando como prioridad el espejo de agua existente actualmente; y
- Las secciones de análisis fueron trazadas en sectores representativos, considerando la mayor altura y pendiente de los taludes.

Los criterios de aceptabilidad, para la condición de operación, adoptados para los análisis estáticos y pseudo-estáticos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18

Criterios de aceptabilidad

Condición de Análisis	Factor de Seguridad Mínimo	Condición de Análisis
Estático	1.3	Estático
Pseudo - Estático	1.0	Pseudo - Estático

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales fueron obtenidas a partir de ensayos de campo, informes anteriores y resultados de ensayos de laboratorio, estos últimos realizados en muestras representativas del material de desmonte de mina, para muestras de hasta 6" de diámetro, remoldeadas en los ensayos triaxiales.

La descripción de resultados de laboratorio y los resultados se presentan en el capítulo anterior. A continuación se muestra una descripción de la estimación de los parámetros de resistencia.

4.1.1.1 Desmonte de mina. El material de desmonte de mina ha sido obtenido de los sectores de relleno aledaños a la ubicación proyectada de la rampa Copaycocha. Este material que se usará como relleno controlado presenta una clasificación SUCS de GC (grava arcillosa), además de presentar porcentajes considerables de bolonería y bloques.

Se consideró un peso específico de 19 kN/m³, como valor promedio de los ensayos de reemplazo de agua. En promedio el material presenta valores de cohesión nulo y ángulos de fricción que varían entre 39° y 42.3°, de manera que se asignó un valor promedio de 40° para este material.

4.1.1.2 Enrocado. El enrocado ubicado como base de fundación de la rampa Copaycocha, tiene por objetivo estabilizar la cimentación y proporcionar condiciones drenantes apropiadas. Para determinar su resistencia cortante se emplearon las correlaciones de Leps (1970), alcanzando un valor de ángulo de fricción de 42°.

4.1.1.3 Basamento rocoso. El basamento rocoso se estimó con un peso específico de 24 kN/m³, siendo que para efectos de estabilidad se consideró que las envolventes de falla no atravesarán este material, de manera que consideró resistencia infinita, según modelos del software Slide.

4.1.1.4 Suelo de fundación. El suelo de fundación remanente luego de la limpieza del bofedal, se caracteriza en SUCS como limo de plasticidad media y grava arcillosa. Dado que la envolvente de falla en este sector tiene una orientación semi horizontal, se consideró la ejecución de ensayos de corte directo, según ASTM D 4080. De acuerdo a los resultados obtenidos, se consideró una cohesión de 15 kPa y un ángulo de fricción de 25°.

La siguiente tabla muestra un resumen de las propiedades de resistencia consideradas para en cada material.

Tabla 19

Resumen de propiedades de resistencia.

Material	Peso Específico (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Angulo de fricción (°)
Desmonte de mina	19	0	40
Suelo de fundación	18	15	25
Enrocado	22	0	42
Basamento rocoso	24	Resistencia elevada	

Fuente: Elaboración propia

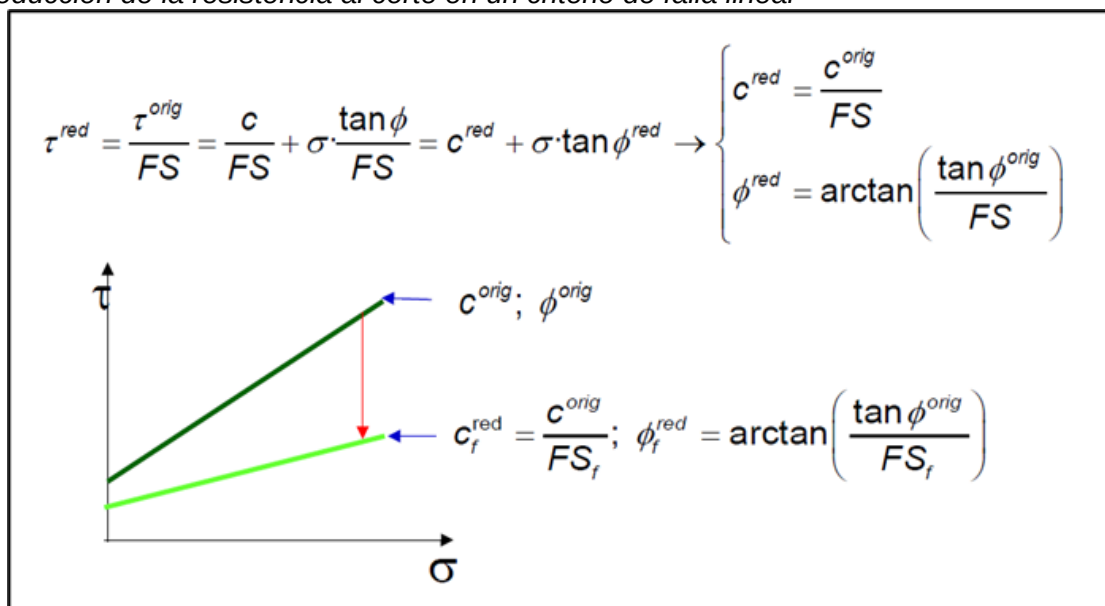
4.1.2 Análisis de estabilidad vía reducción de resistencia cortante

Se construyeron dos modelos numéricos representativos de cada estructura con el propósito de calcular los factores de seguridad mediante el método de reducción de los parámetros de resistencia cortante. A través de este análisis, se identificaron contornos de factores de seguridad no circulares, asociados a deformaciones en condiciones estáticas y bajo la influencia de un componente de aceleración horizontal pseudo-estática.

El método utilizado, común en softwares de elementos finitos o diferencias finitas, fue aplicado en el software FLAC 8.0. Consiste en alcanzar el equilibrio con las propiedades estimadas de los materiales y, posteriormente, iniciar una reducción secuencial de la resistencia al corte (cohesión, coeficiente de fricción y resistencia a la tracción) hasta determinar el factor de seguridad (FS). Este factor se define como el cociente entre la resistencia original y la resistencia que causa la falla, expresado como $FS = c_{orig}/c_{falla} \text{ y } \tan\phi_{orig}/\tan\phi_{falla}$. Se establece la falla cuando se detecta una velocidad de desplazamiento constante en el talud analizado, y el FS se sitúa entre la última condición estable y la primera inestable determinada por la reducción de la resistencia al corte.

Figura 9

Reducción de la resistencia al corte en un criterio de falla lineal



Fuente: Mohr - Coulomb

4.1.3 Análisis de estabilidad por equilibrio límite

El cálculo del factor de seguridad se llevó a cabo en secciones representativas de cada estructura, complementando los análisis mediante el método de reducción de resistencia cortante. Se utilizó el método de equilibrio límite, incorporando enfoques simplificados y rigurosos, como los de Bishop, Spencer y Morgenstern-Price, siendo el método de Spencer el seleccionado por su estabilidad numérica y cumplimiento de todas las ecuaciones de equilibrio estático.

El análisis asumió que los materiales de la estructura son homogéneos e isotrópicos, considerando el colapso como el resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento. En el análisis pseudo-estático, se incorporó una fuerza horizontal equivalente a un coeficiente sísmico multiplicado por el peso de la masa deslizante, simulando de manera aproximada el efecto de las fuerzas inerciales generadas por un sismo. Para este estudio, se utilizó el software Slide v.6.0 (Rocscience, 2011) para evaluar la estabilidad.

4.1.4 Coeficiente sísmico

La literatura técnica recomienda que el coeficiente sísmico para el análisis pseudo-estático de taludes se obtenga como una fracción entre $1/3$ y $1/2$ de la máxima aceleración esperada (PGA), criterio respaldado por el USACE y la Federal Highway Administration. En Perú, la normativa E050 y CE.020 no especifica este valor, por lo que es común adoptar el 50 % del PGA.

Para la rampa Copaycocha y su depósito de desmonte temporal, con 10 años de exposición, se considera un periodo de retorno de 100 años y un coeficiente sísmico de 0.09, basado en el estudio de BISA (2011).

4.1.5 Análisis estático

Como primer paso se simuló el estado de esfuerzos presentes en la fundación, bajo condiciones estáticas. Seguidamente, se incorpora el material de desmonte en un número discreto de etapas, obteniéndose la distribución de esfuerzos al interior de los depósitos. La Figura 10 muestra el modelo geométrico para la sección R1 construido en FLAC.

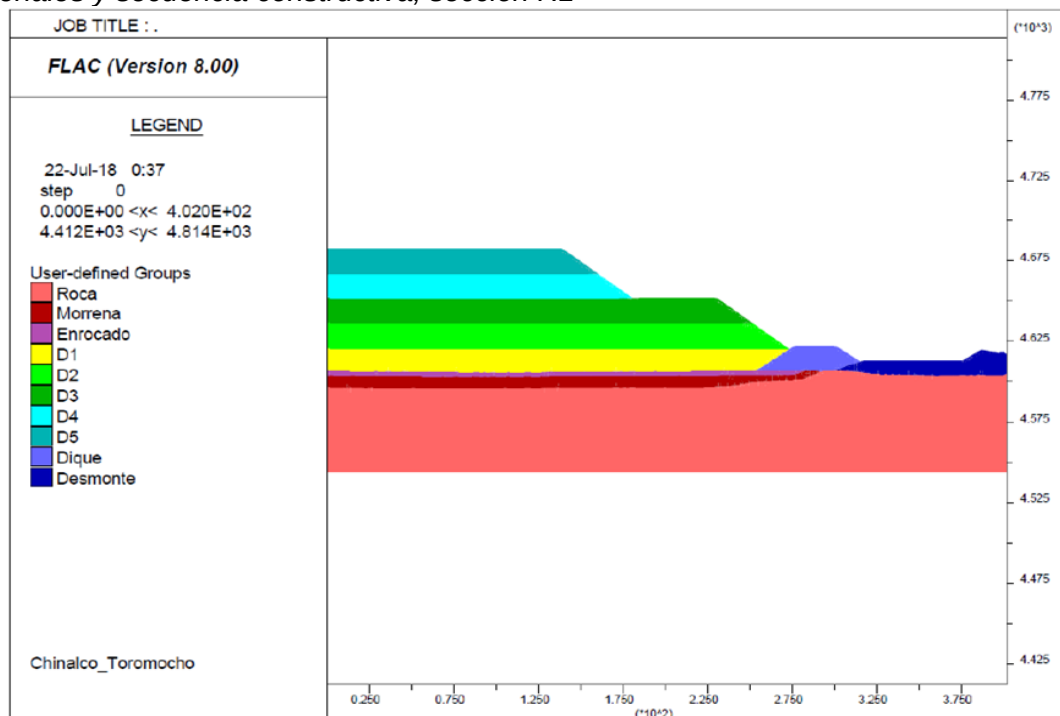
Las propiedades de los materiales utilizadas en el modelo FLAC se describen en detalle en los capítulos anteriores. Las principales características del modelo, en términos de propiedades, esfuerzos verticales, horizontales, de corte y presiones de poros, serán mostrados en las siguientes figuras.

La data que se utilizó para alimentar el software, son los datos que se obtuvieron por las investigaciones geotécnicas y ensayos de laboratorio.

- Desmonte de mina: PE 19 kN/m³, cohesión 0 kPa, ángulo de fricción 40°.
- Suelo de fundación: PE 18 kN/m³, cohesión 15 kPa, ángulo de fricción 25°.
- Enrocado: PE 22 kN/m³, cohesión 0 kPa, ángulo de fricción 42°.
- Basamento rocoso: PE 24 kN/m³.
- La geometría fue otorgada por el área de planeamiento, con lo que se evaluara los parámetros geomecánicos conforme se construye el stock de mineral y rampa.
- Según las calicatas realizadas el nivel freático se encuentra a 1.30 – 1.50 metros del terreno inicial.
- Según ensayos de refracción sísmica se determinó un Coeficiente sísmico de 0.09.

Figura 10

Materiales y secuencia constructiva, sección R1

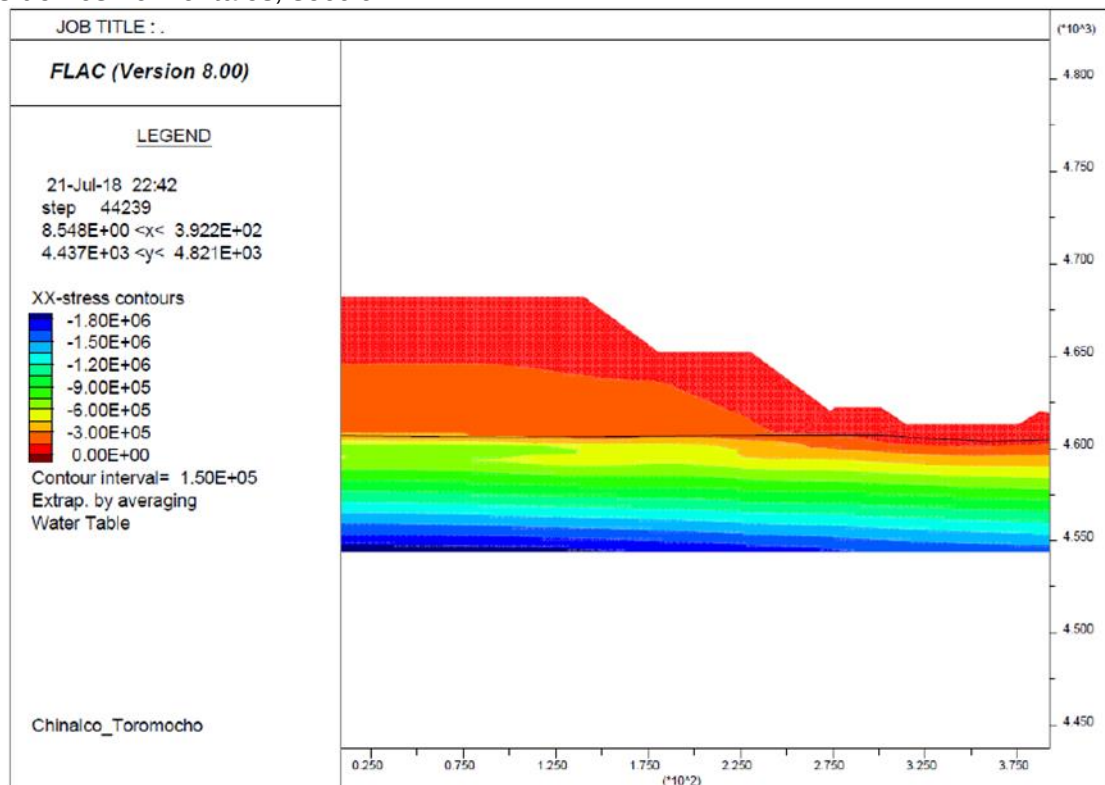


Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

En la figura 10 se establece como será el proceso de construcción del stock, empezando por el dique en color morado, el cual delimitará la morrena (laguna fluvioglacial), seguido por las capas D1, D2 y así sucesivamente. Esto se hace para tener una visión realista del proceso de apilamiento de material. Y ver como este afectara a la estabilidad de la estructura total.

Figura 11

Esfuerzos horizontales, sección R1



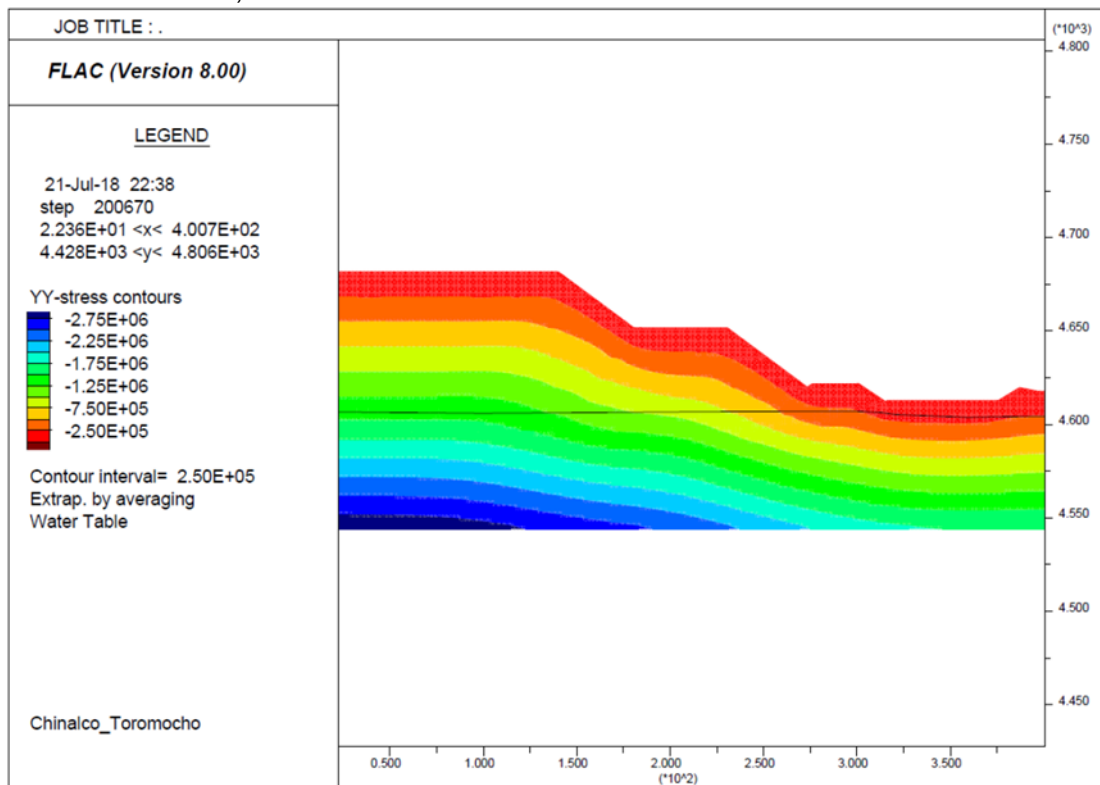
Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

De la figura 11, se puede concluir que en la infraestructura final no se generaran esfuerzos efectivos horizontales considerables. En este caso los esfuerzos horizontales en los taludes serian de 0.15 – 0.30 Mpa. En la parte donde se recubrirá la morrena se generarían esfuerzos de 0.60 – 0.75 Mpa.

De igual manera, en la figura 12, se puede concluir de los esfuerzos verticales generados en la superficie del stock son de entre 0.20 – 1.25 Mpa. Se puede apreciar la continuidad de aumento de estos esfuerzos, sin generar zonas donde haya variaciones radicales de tensiones verticales.

Figura 12

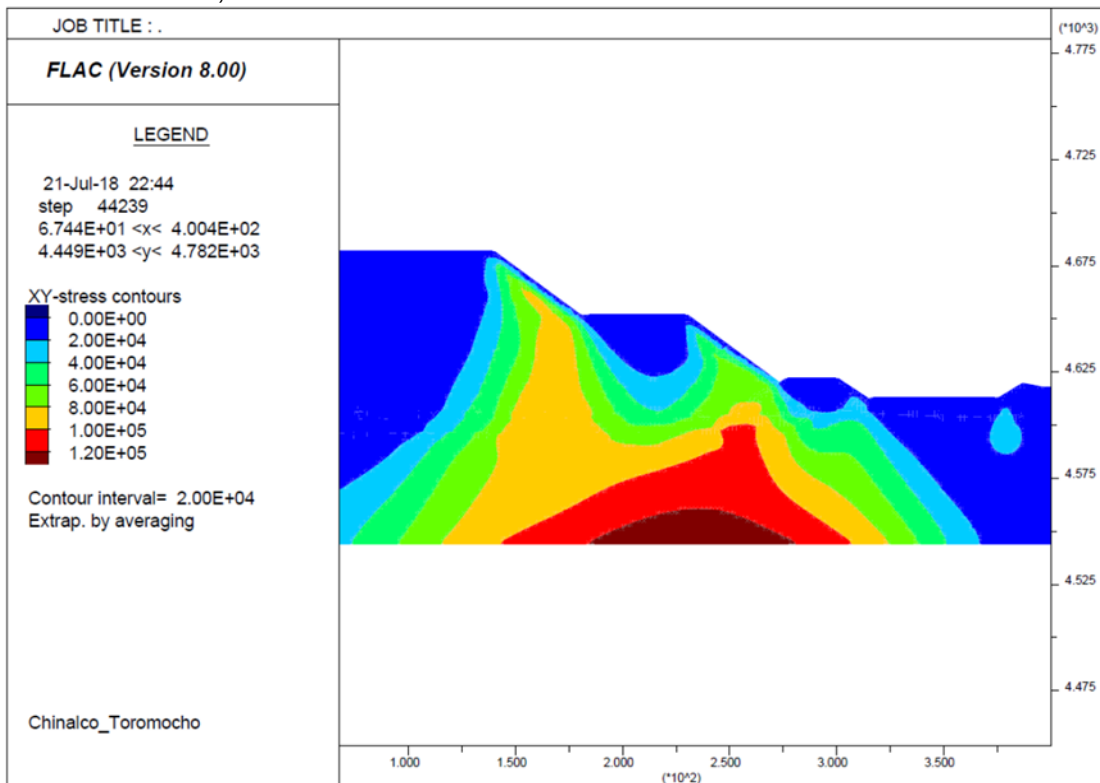
Esfuerzos verticales, sección R1



Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

Figura 13

Esfuerzos de corte, sección R1

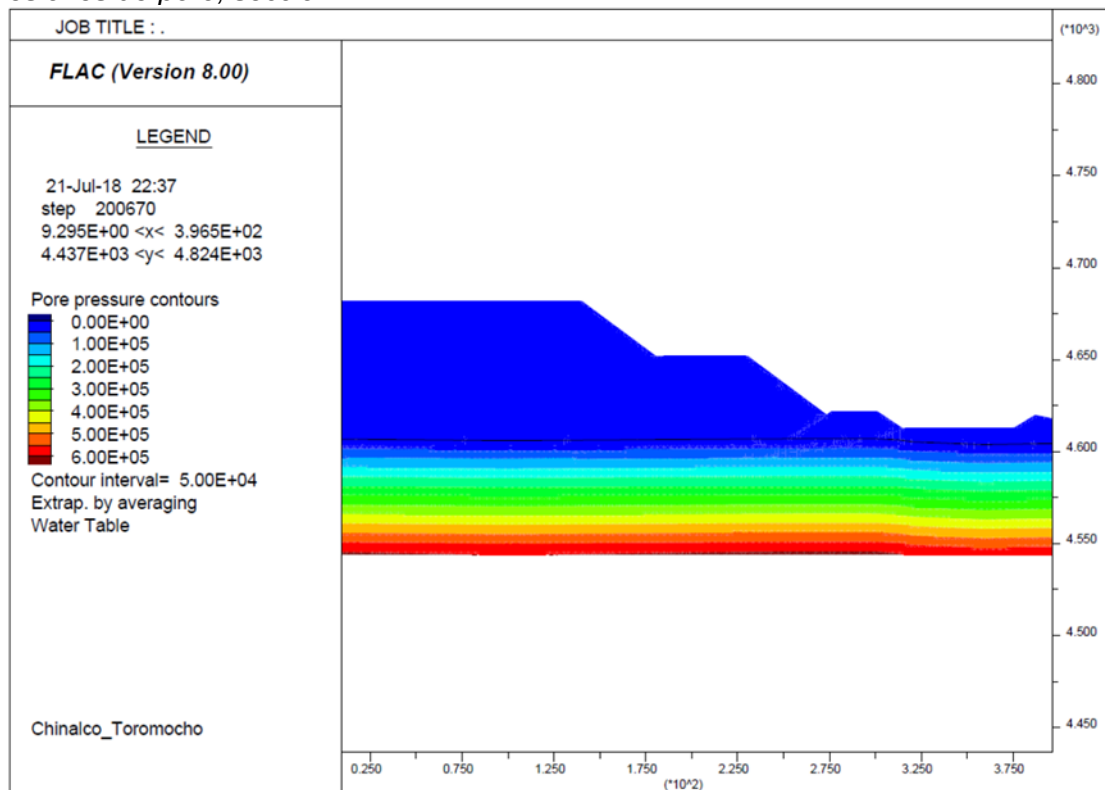


Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

La figura 13 nos muestra los esfuerzos de corte que se generarían en la infraestructura, también nos indica por donde podría fallar el talud (lo cual sería paralelo a la cara del talud). Pero lo que más resalta es que la estructura será bien estable, ya que los valores de esfuerzo cortante con bien bajos, los cuales van de 20 kPa en la superficie hasta 0.12 Mpa en el macizo rocoso.

Figura 14

Presiones de poro, sección R1

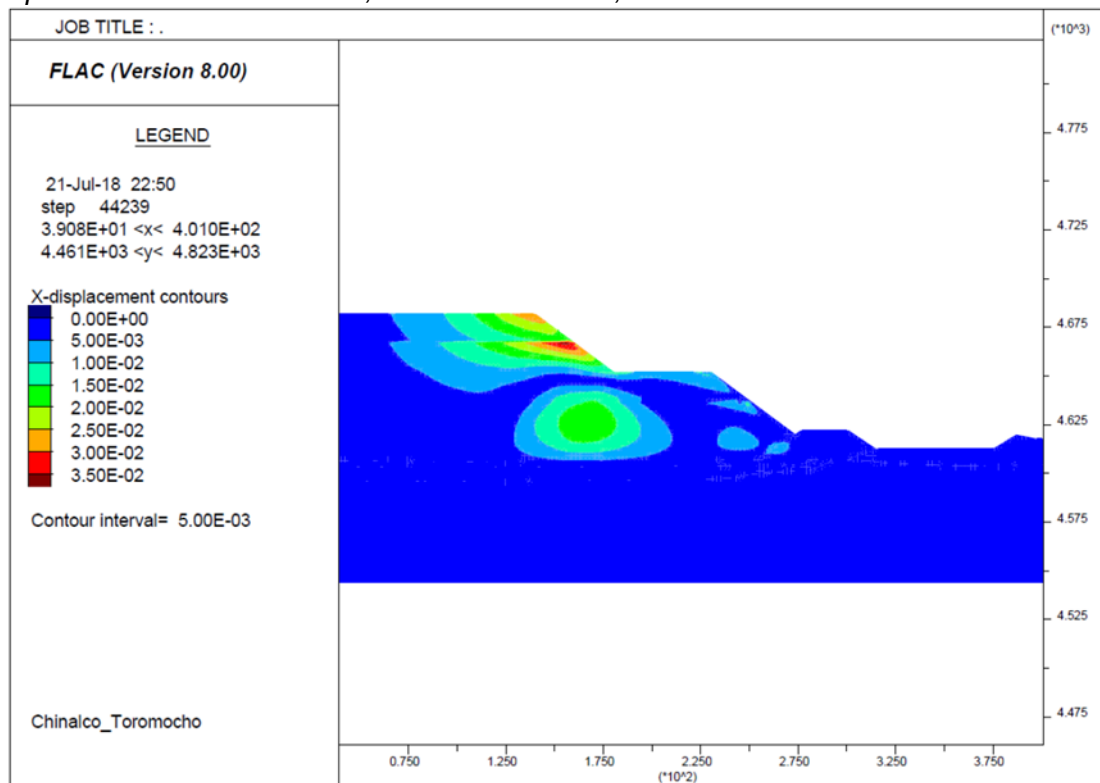


Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

La figura 14, muestra la presión de poro (peso específico del agua x altura), en este caso los valores generados son de 0.0 ya que el nivel freático se encuentra debajo del stock. Debajo del nivel freático se empieza a considerar estos parámetros.

Figura 15

Desplazamientos horizontales, condición estática, sección R1



Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

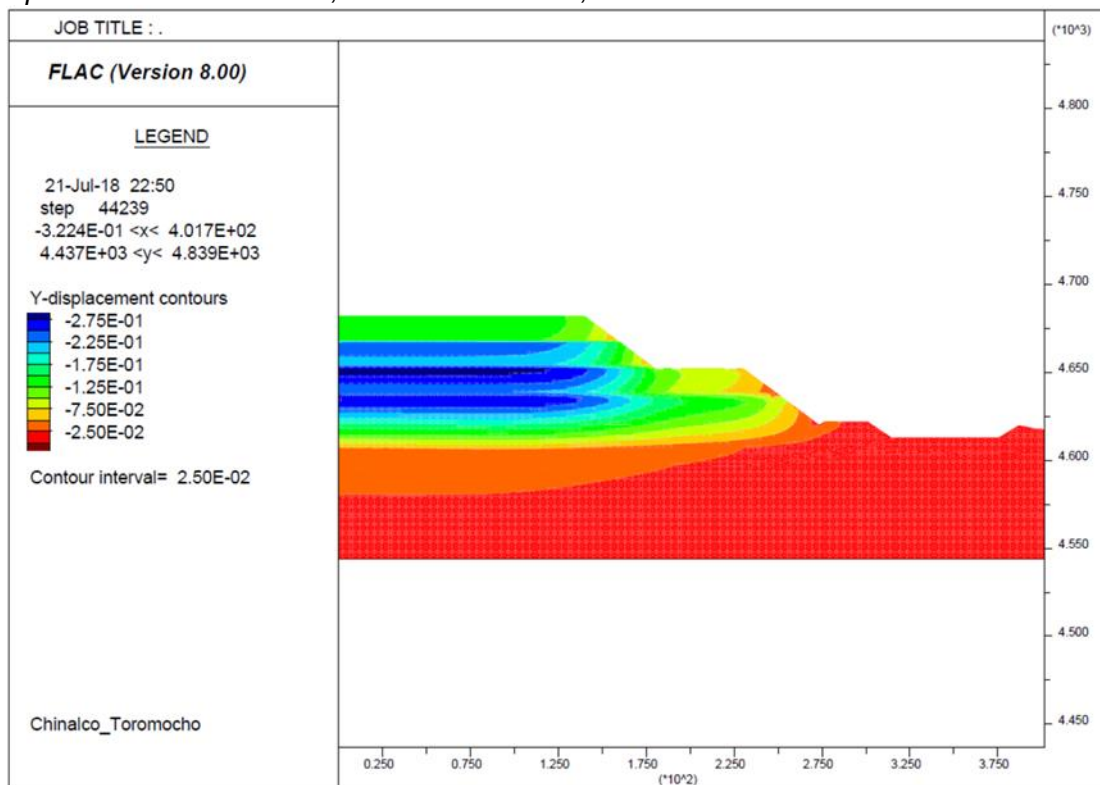
De la figura 15, se concluye que se generan desplazamientos horizontales mínimos, siendo los más críticos los generados en la cresta de los taludes. Los valores van de 0.0 – 3.5 cm.

En la figura 16 se muestra los desplazamientos verticales, en la parte central del stock se generan movimientos de hasta 20 cm debido al apilamiento de material. En la cresta de los taludes se generan desplazamientos de entre 5 – 7.5 cm.

En ambos casos los desplazamientos no son críticos, garantizando la estabilidad de los taludes.

Figura 16

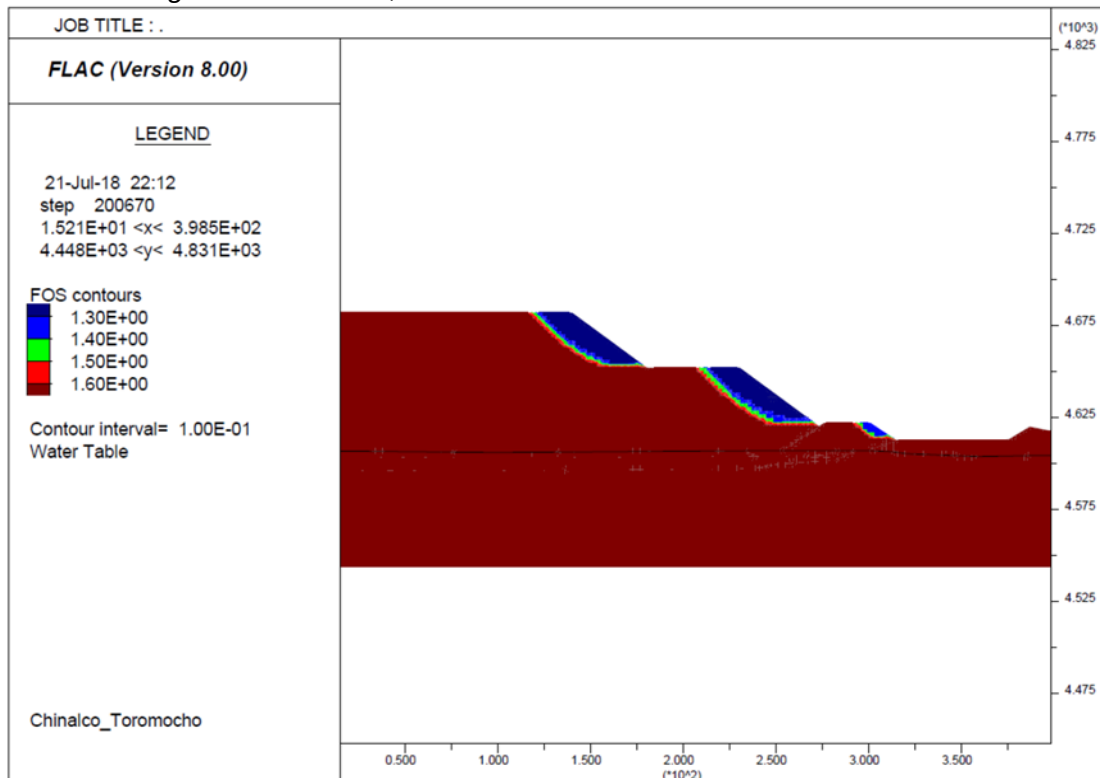
Desplazamientos verticales, condición estática, sección R1



Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

Figura 17

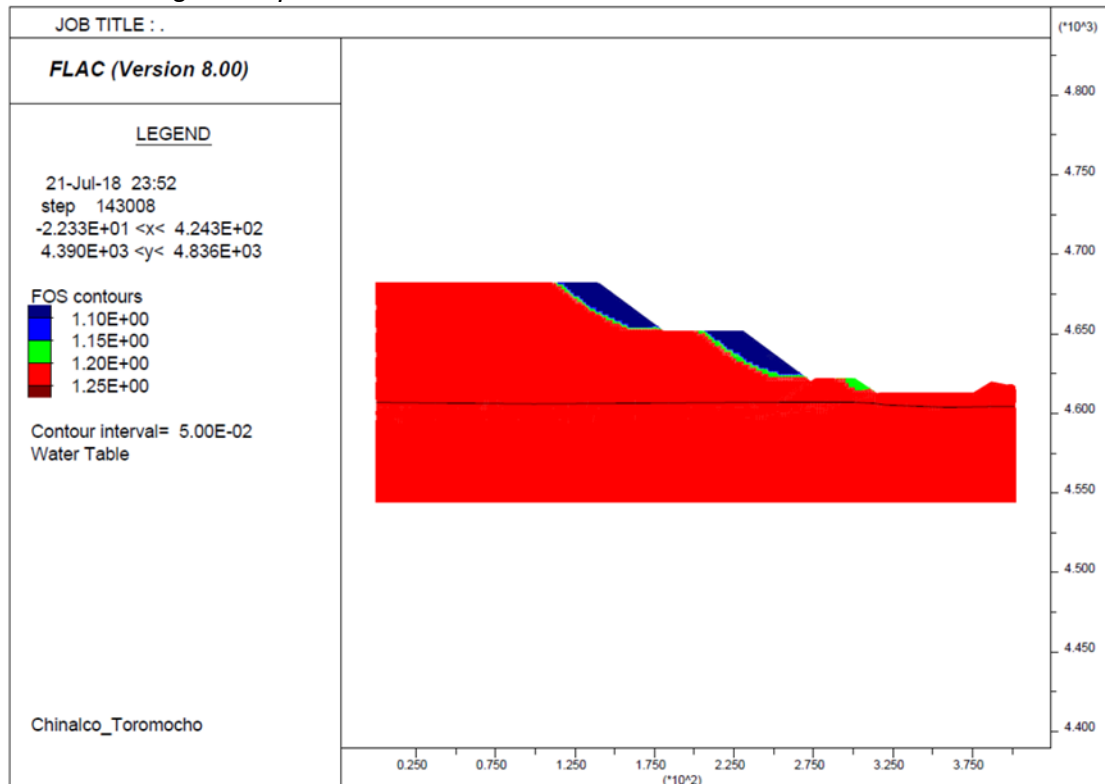
Factores de seguridad estáticos, sección R1



Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

Figura 18

Factores de seguridad pseudo estáticos, sección R1



Fuente: Elaboración propia – Software FLAC 8.00

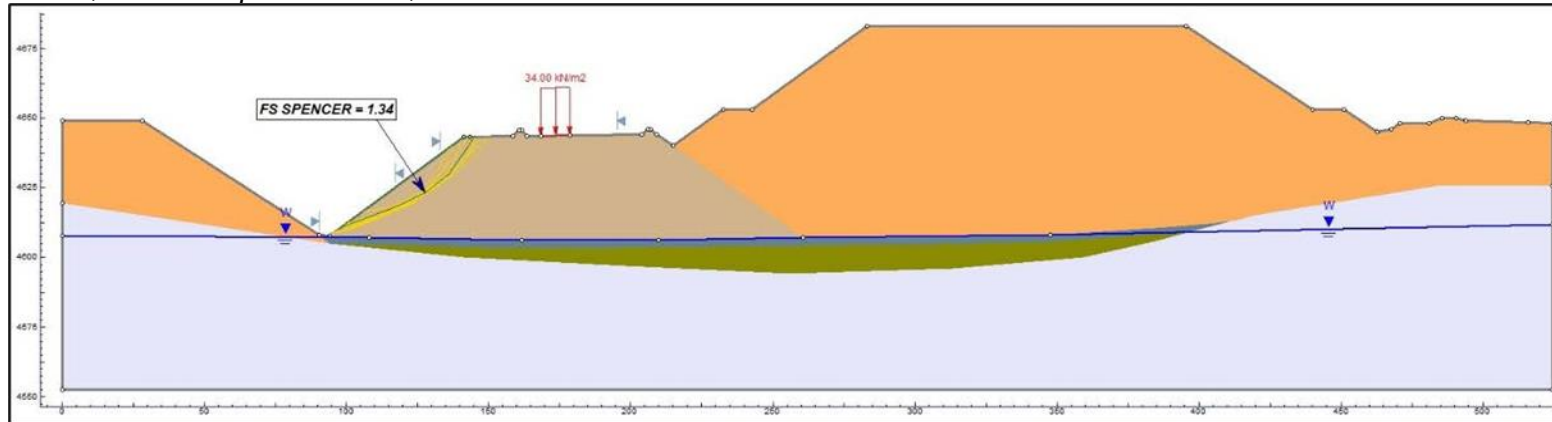
En las figuras 17 y 18 se muestra el comportamiento del factor de seguridad en un entorno estático y pseudo-estático (sísmico).

En el caso del análisis estático se observan F.S. mayores a 1.30 – 1.50 en la zona de falla, mientras que el pseudo-estático muestra F.S. de entre 1.10 – 1.20.

Los cuales son valores que garantizan la estabilidad del talud.

Figura 19

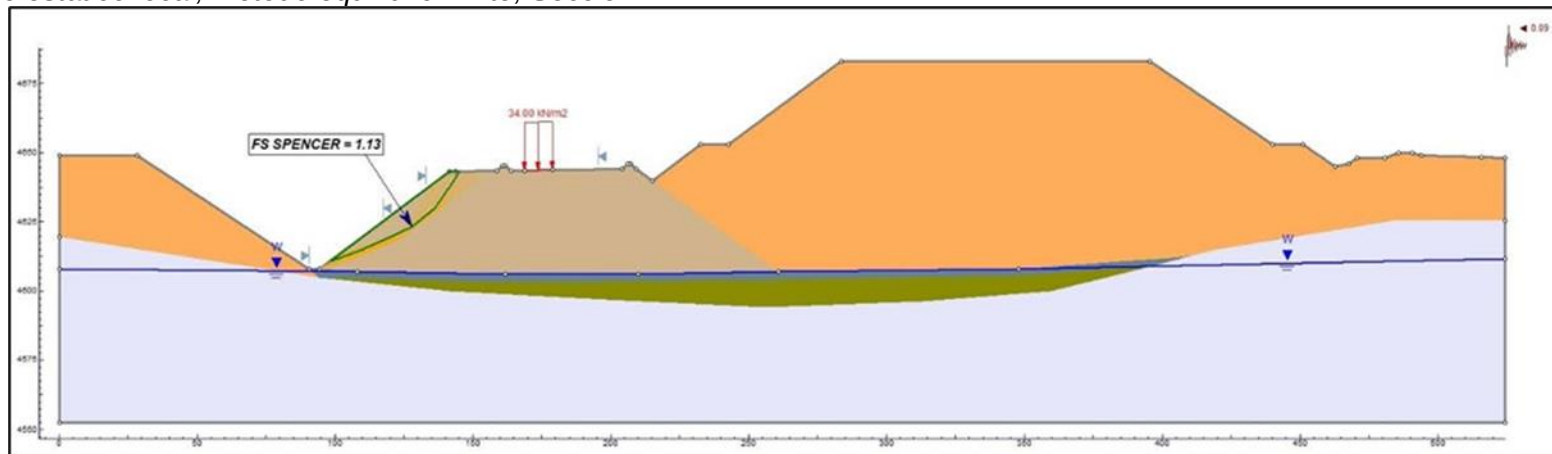
F. S. estático local, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLIDE

Figura 20

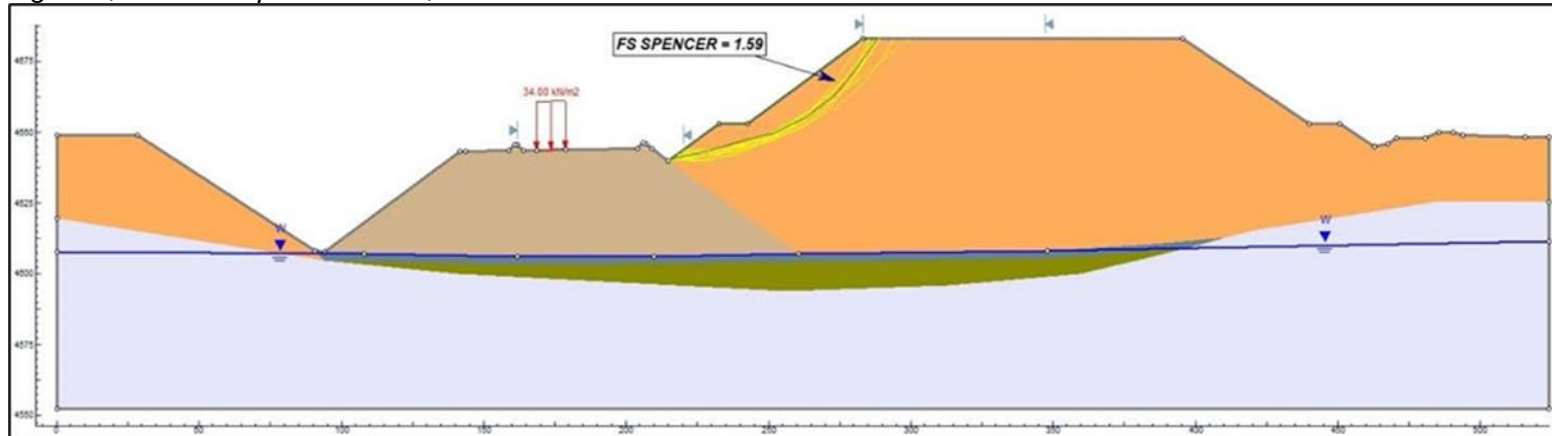
F. S. pseudo estático local, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLIDE

Figura 21

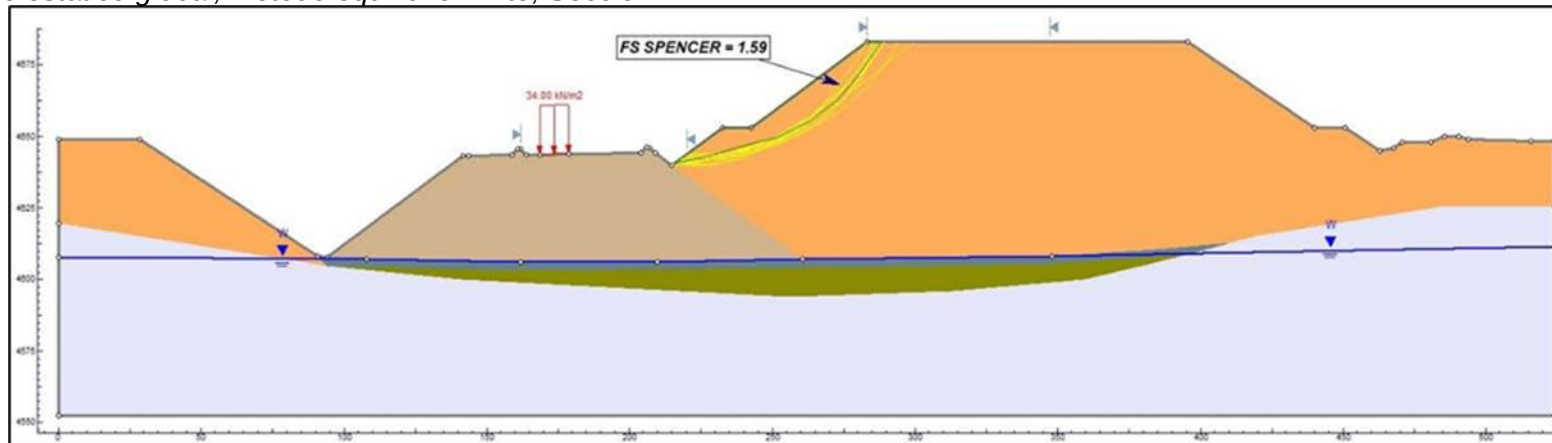
F. S. estático global, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLIDE

Figura 22

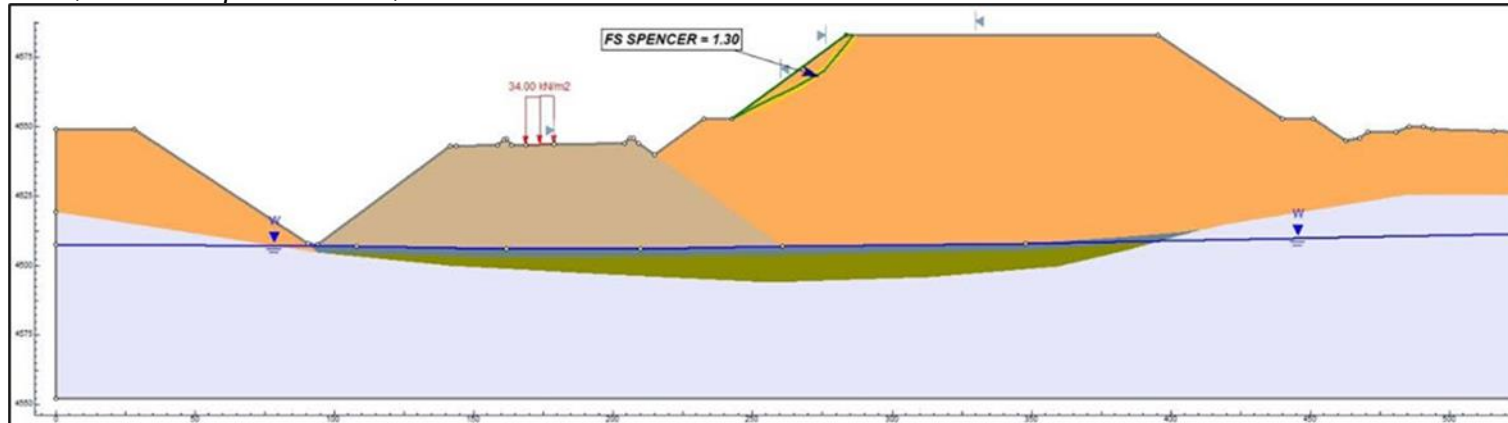
F. S. pseudo estático global, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLIDE

Figura 23

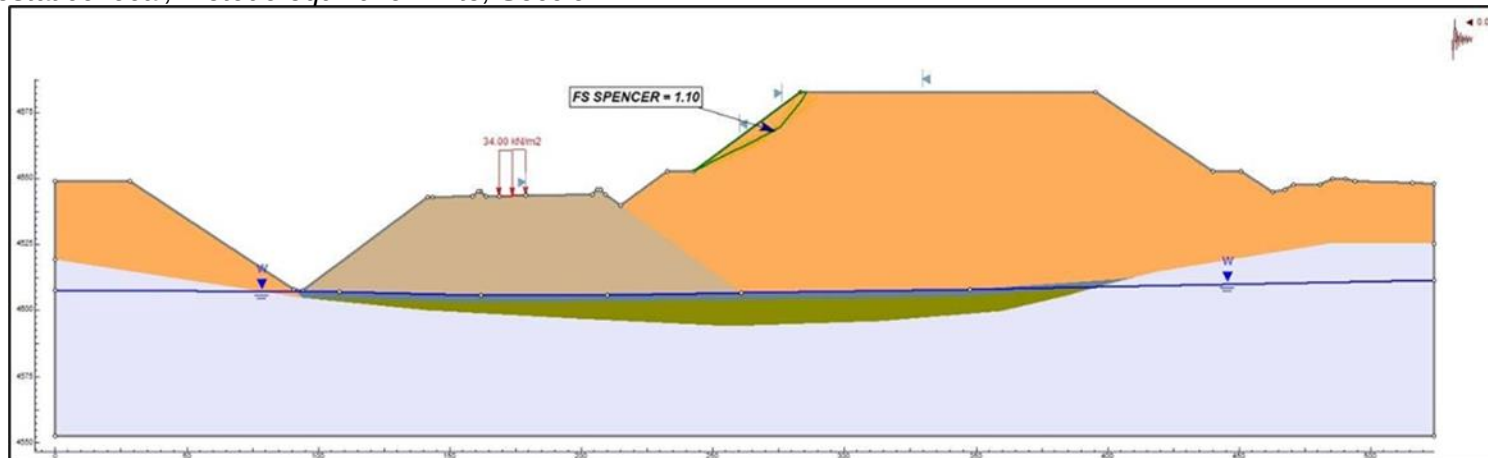
F. S. estático local, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLIDE

Figura 24

F. S. pseudo estático local, método equilibrio límite, Sección R2



Fuente: Elaboración propia – Software SLID

En las figuras 19 – 24 se analizó el factor de seguridad de la estructura desde un punto de vista global y local (rampa y stock). Se evaluaron escenarios de falla para los tres casos mencionados. También se consideró la presencia del nivel freático para tener valores más acordes a la realidad de la mina.

Se puede concluir que el F.S. en rampa fue de 1.34 estático y 1.13 pseudo-estático. En el stock el F.S. fue de 1.30 estático y 1.10 pseudo-estático. Y en el caso global, donde se abarco una falla de mayor tamaño, se obtuvo valores de F.S. de 1.59 estático y 1.33 pseudo estático.

4.2 Validación de hipótesis

En esta sección iniciamos planteando la hipótesis nula y alternativa

- H0: Realizar un análisis geotécnico detallado del terreno y se implementan medidas de estabilización adecuadas, no permitirá construir el stock de mineral sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del área.
- HA: Realizar un análisis geotécnico detallado del terreno y se implementan medidas de estabilización adecuadas, permitirá construir el stock de mineral sobre fundación de baja resistencia de origen fluvioglacial sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del área.

La Tabla 20 muestra en resumen los resultados obtenidos, en términos de factores de seguridad, tanto para la condición estática y pseudo estática, para los métodos de reducción de resistencia cortante y equilibrio límite.

Tabla 20

Resumen de factores de seguridad obtenidos por los métodos de reducción de resistencia y equilibrio límite

Estructura	Sección	Método	Factor de seguridad	
			Estático	Pseudo-estático
Rampa y stock Copaycocha	R1	Reducción de resistencia	>1.3	>1.1
	R2	Equilibrio límite. Local rampa	1.34	1.13
		Equilibrio límite. Local stock	1.30	1.10
		Equilibrio límite. Global	1.59	1.33

Fuente: Elaboración propia

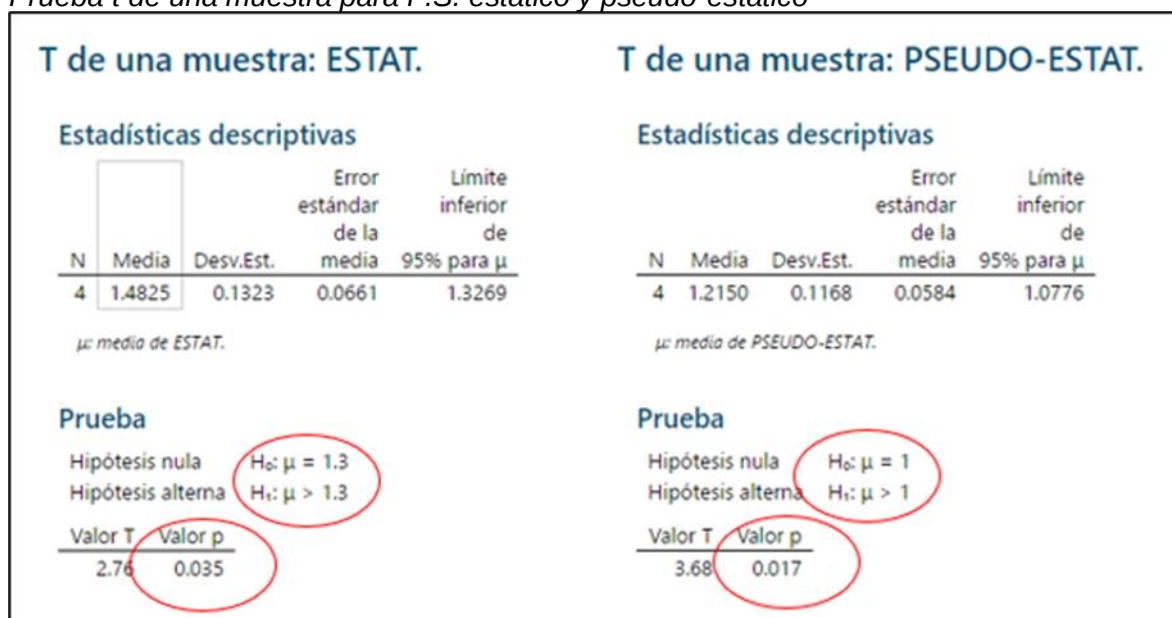
Dado la poca cantidad de datos, realizamos la prueba t de student para determinar el valor de p, nos ayudaremos del software Minitab. Se usará los criterios de aceptabilidad descritos en la tabla 18. F.S. mínimo para estático 1.3 y F.S. mínimo para pseudo-estático 1.0.

Consideramos lo siguiente:

- Numero de datos a analizar: 4 (mostrados en tabla 20)
- Grado de significancia: 5% = 0.05

Figura 25

Prueba t de una muestra para F.S. estático y pseudo-estático



Fuente: Elaboración propia con software Minitab

Obtenemos que en ambos casos el valor de p es menor a 0.05 (5% grado de significancia).

En este caso se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa. Por lo tanto, “realizar un análisis geotécnico detallado del terreno y se implementan medidas de estabilización adecuadas, permitirá construir el stock de mineral sobre fundación de baja resistencia de origen fluvio-glacial sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del área”.

Conclusiones

Las investigaciones geotécnicas han consistido en la ejecución de un total de 04 sondajes mediante posteadora manual, ejecución de 03 ensayos DPL, muestreo de 02 puntos de material granular del material de desmonte de mina y la ejecución de ensayos geofísicos mediante 05 línea de refracción sísmica y 01 ensayos MASW.

La combinación de ensayos geofísicos, mecánicos y químicos permitió una caracterización integral del suelo de fundación, validando la pertinencia de los métodos empleados en la evaluación geotécnica de la rampa Copaycocha.

De los resultados de la investigación geofísica se han definido el siguiente perfil sísmico del terreno de fundación. Rampa Copaycocha presenta un suelo de cobertura blando con un espesor de hasta 3 m y con velocidad promedio de ondas Vp entre 260 m/s y 389 m/s; por debajo se encuentra material morrénico medianamente densa con velocidad de ondas Vp entre 1 123 m/s y 1 331 m/s con un espesor de hasta 17 m; y por debajo se encuentra la roca alterada con velocidad de ondas Vp entre 2 108 m/s y 2 752 m/s.

De los resultados de los ensayos geofísicos se tiene los siguientes parámetros elásticos los materiales identificados en la fundación de cada deposito además de la velocidad Vs30:

Tabla 21

Resultados de ensayos geofísicos

Zona	Ensayo	Profundidad (m)	Es* (Kg/cm ²)	Vs30 (m/s)
Rampa Copaycocha	MASW-CO-1	4.20	106	475 Suelo Tipo C
		13.00	694	
		-	1326	

Fuente: Elaboración propia

La identificación de capas de suelo con distintas velocidades de propagación de ondas sísmicas ha sido clave para definir la capacidad portante del terreno y la profundidad óptima de cimentación, asegurando la estabilidad estructural.

Como nivel de cimentación se recomienda eliminar material inadecuado hasta una profundidad mínima de 3.0 m en la zona de la Rampa Copaycocha. Sin embargo en

durante la ejecución se deberá tomar la previsión de eliminar todo material inadecuado según indicaciones de la supervisión. Dado que se puede encontrar de manera localizada sectores o bolsones de material saturado no competentes para soportar la estructura.

Los resultados de los ensayos químicos indican niveles de agresividad moderada por lo que se recomienda utilizar cemento tipo V.

Los análisis de estabilidad muestran que la estructuras son estables físicamente ya que sus factores de seguridad, obtenidos mediante las metodologías de reducción de resistencia cortante y equilibrio límite, alcanzan los criterios de aceptabilidad.

Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo geotécnico para evaluar posibles asentamientos diferenciales en la cimentación y detectar a tiempo cualquier inestabilidad.

En caso de identificar materiales inadecuados en la excavación, considerar el uso de técnicas de mejoramiento como compactación dinámica, geotextiles o mezclas con cal/cemento para mejorar la capacidad portante del terreno.

Diseñar un sistema de drenaje adecuado para evitar acumulaciones de agua en la base de la rampa, reduciendo el riesgo de erosión y saturación del suelo, lo que podría comprometer su estabilidad.

En caso de ampliaciones o modificaciones futuras en la rampa, realizar nuevos estudios geotécnicos y geofísicos para verificar la evolución de las condiciones del terreno y garantizar la seguridad de la infraestructura.

Referencias bibliográficas

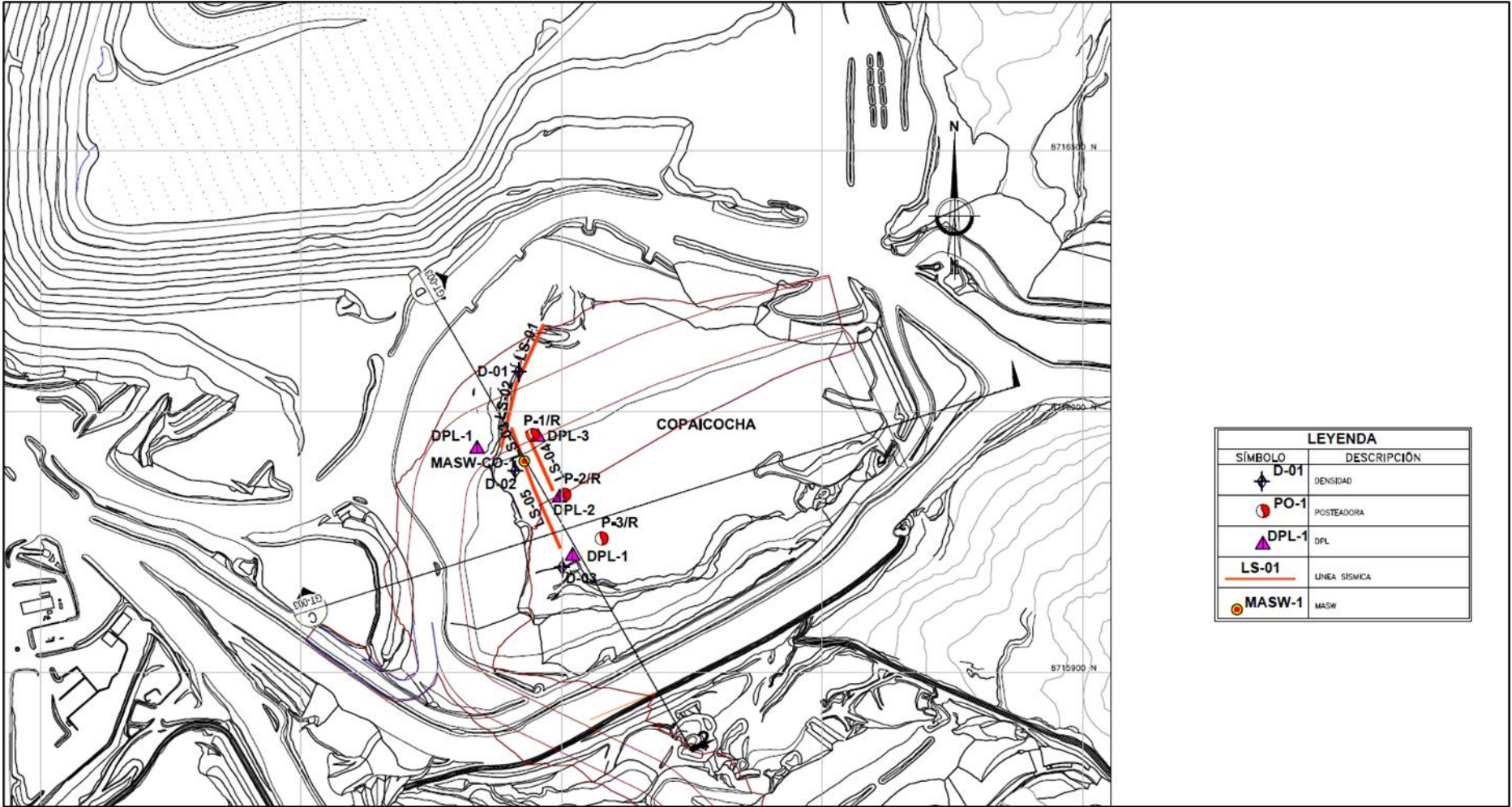
- Bishop, A. W. (1955). *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique*, 5(1), 7-17.
- British Columbia Mine Waste Rock Dump Research Committee (1991). *Investigation and Design Manual*.
- Ccahuata, J. et al (2023). *Evaluación geológica y geotécnica para el emplazamiento de la Presa Aruri – Chumbivilcas*, Cusco 2022.
- Chirinos, J. et al (2023). *Estudio geotécnico para la construcción de la represa de almacenaje de agua en Huayllumayo, Espinar - Cuzco*.
- Das, B. M. (2011). *Principles of geotechnical engineering (8th ed.)*. Cengage Learning.
- Evans, D. et al. (2021). *A Practical Guide to the Study of Glacial Sediments*. Wiley-Blackwell.
- Hermosilla, D. (2021). *Caracterización geológica-geotécnica de la zona de implantación del Embalse Livilcar, Valle de Azapa, Región de Arica y Parinacota, Chile*.
- Hoek, E. et al (1981). *Rock slope engineering (3rd ed.)*. CRC Press.
- Instituto Nacional de Normas Técnicas (INNT). (2020). *Norma para la evaluación geotécnica de taludes en minería a cielo abierto*.
- ISO 22476-2. (2005). *Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 2: Dynamic probing*. International Organization for Standardization.
- Itasca Consulting Group, Inc (2016). *Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) Version 8.0*.
- Janbu, N. (1954). *Application of composite slip surfaces for stability analysis*. European Conference on Stability of Earth Slopes.
- Llanos, J. (2013). *Estudio Geológico-Geotécnico de la presa de tierra Cotachaca, distrito Crucero – Carabaya*.
- Morgenstern, N. R. et al (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique*, 15(1).

- Oyarzo, M. (2018). *Estudio Geológico y Geotécnico de diseño del embalse Valle Hermoso, Región de Coquimbo, Chile.*
- Park, C. B. et al (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics, 64(3).
- Prado, F. et al (2015). *Estudio geológico - geotécnico para construcción de la presa Quillca, Alto Pichigua, Espinar, Cusco.*
- Sheriff, R. E. et al (1995). *Exploration seismology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Sociedad de Mecánica de Suelos y Geotecnia de Chile (SMSG). (2018). *Manual de estabilidad de taludes en minería y construcción de infraestructura.*
- Quisocala, S. (2013). *Evaluación geológica y geotécnica para la construcción de la presa de tierra en la laguna Palccaccota.*
- Terzaghi, K. et al (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- Wyllie, D. C. et al (2004). *Rock slope engineering: Civil and mining* (4th ed.). CRC Press.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: de investigaciones geotécnicas.....	1
Anexo 2: Ensayos de campo – Rampa Copaycocha	2
Anexo 3: Líneas de refracción sísmica – Rampa Copaycocha.....	8
Anexo 4: Resultados de ensayos de refracción sísmica	11
Anexo 5: Resultados de ensayos de corte directo	13
Anexo 6: Resultados de ensayos de compresión triaxial	14
Anexo 7: Resultados de análisis químico de suelos.....	18

Anexo 1: de investigaciones geotécnicas



Anexo 2: Ensayos de campo – Rampa Copaycocha



Foto N°01: Vista del ensayo DPL-01

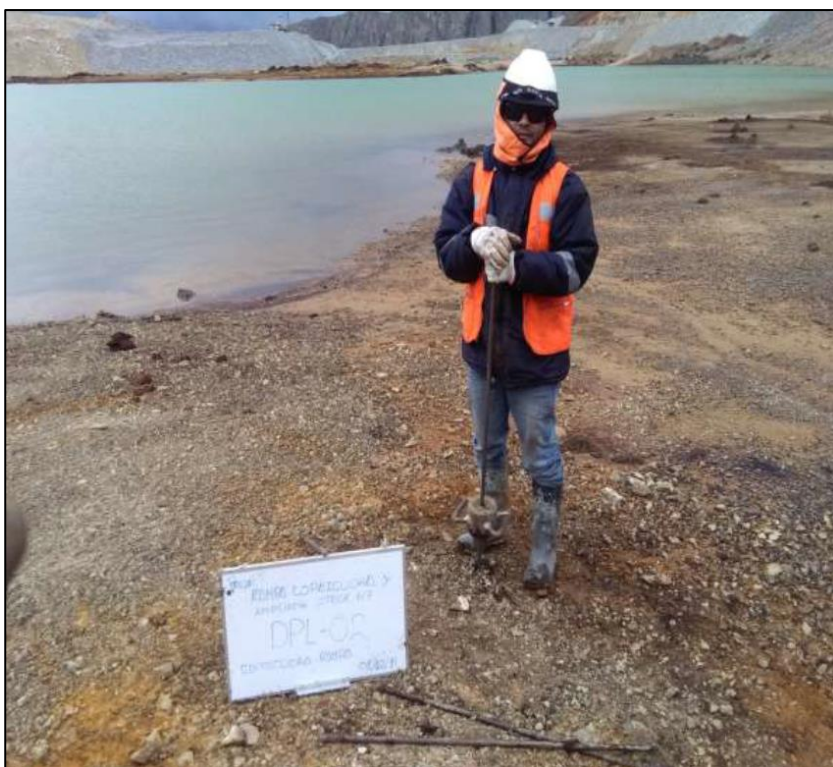


Foto N°02: Vista del ensayo DPL-02



Foto N°03: Vista del ensayo DPL-03



Foto N°04: Vista de toma de muestra M-1 Desmonte 1



Foto N°05: Vista de toma de muestra M-1 Desmonte 2



Foto N°06: Vista de toma de muestra M-1 Desmonte 3



Foto N°07: Vista de ensayo de densidad D-1 Desmonte 1



Foto N°08: Vista de ensayo de densidad D-2 Desmonte 3



Foto N°09: Vista del ensayo Posteadora P-01



Foto N°10: Vista del ensayo Posteadora P-02

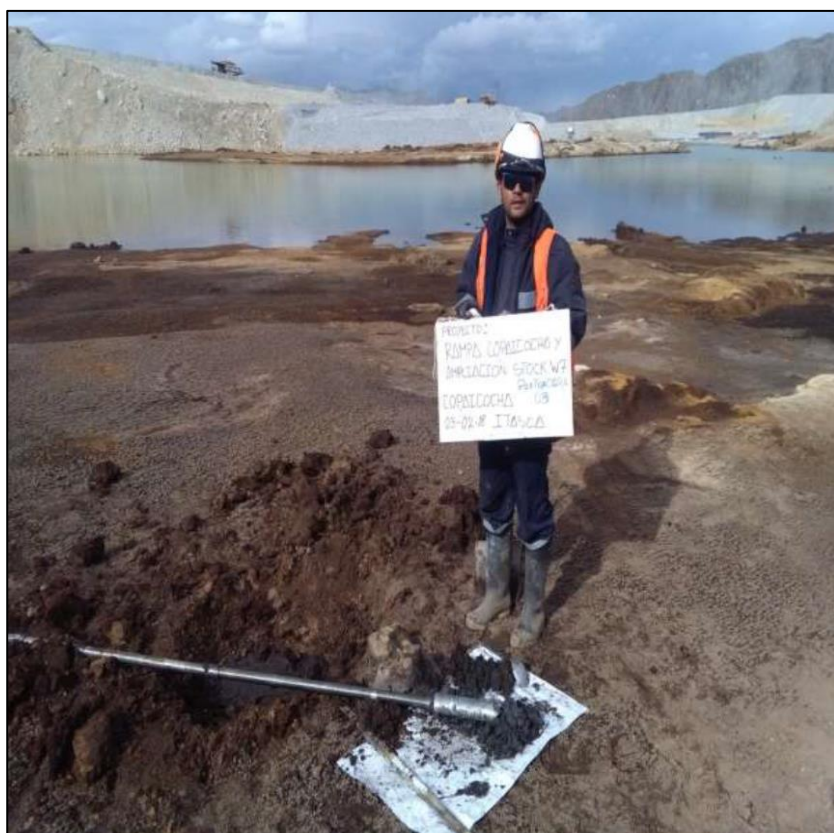


Foto N°11: Vista del ensayo Posteadora P-03

Anexo 3: Líneas de refracción sísmica – Rampa Copaycocha



Foto N°12: Línea Sísmica – LS-01



Foto N°13: Línea Sísmica – LW-01



Foto N°14: Línea Sísmica – MAM-01



Foto N°15: Línea Sísmica – LS-02

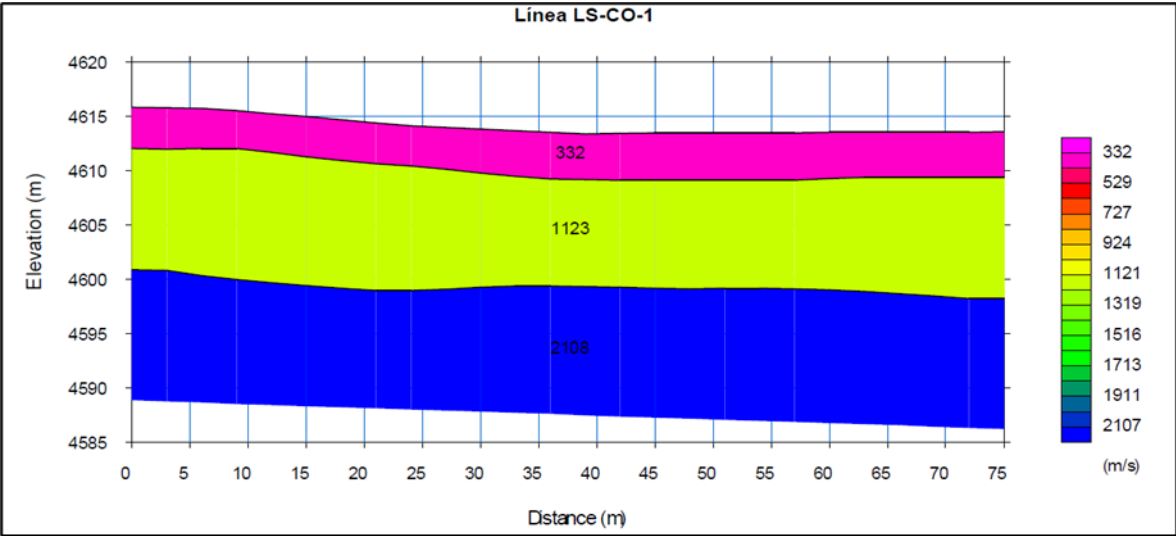


Foto N°16: Línea Sísmica – LS-03

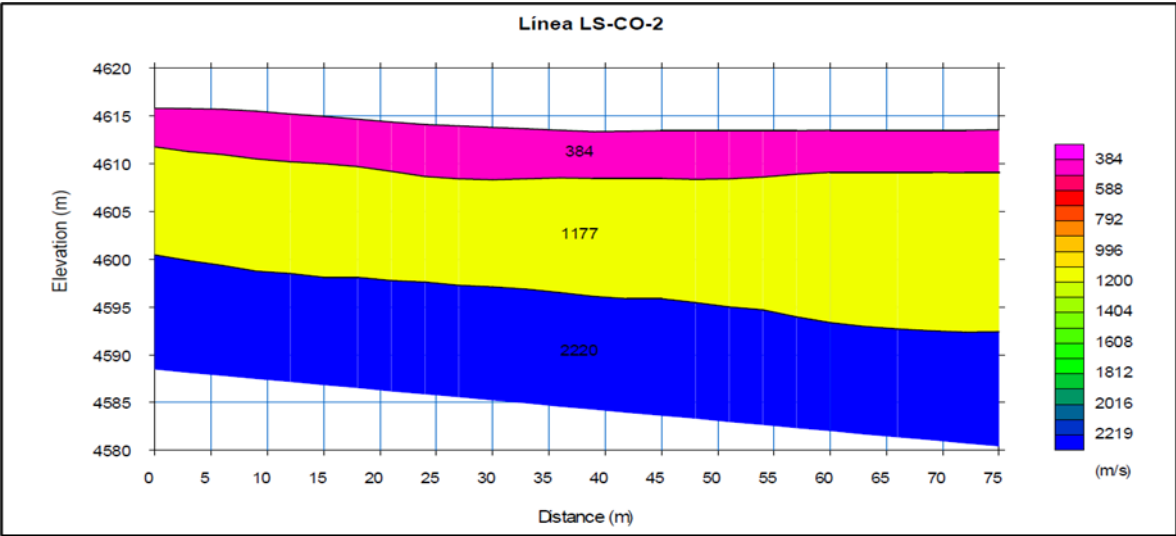


Foto N°17: Línea Sísmica – MAM-02

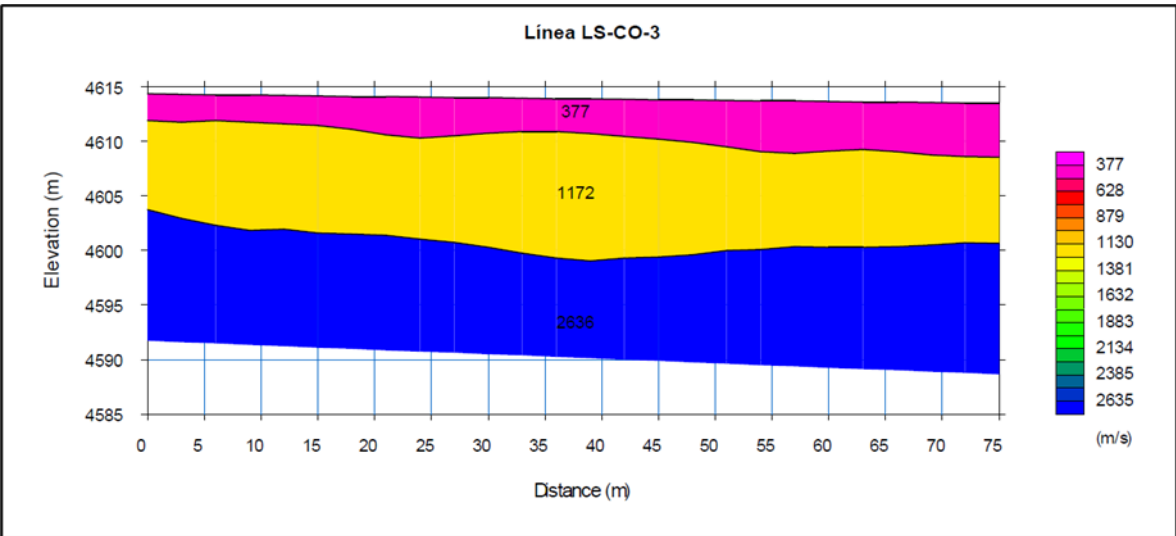
Anexo 4: Resultados de ensayos de refracción sísmica



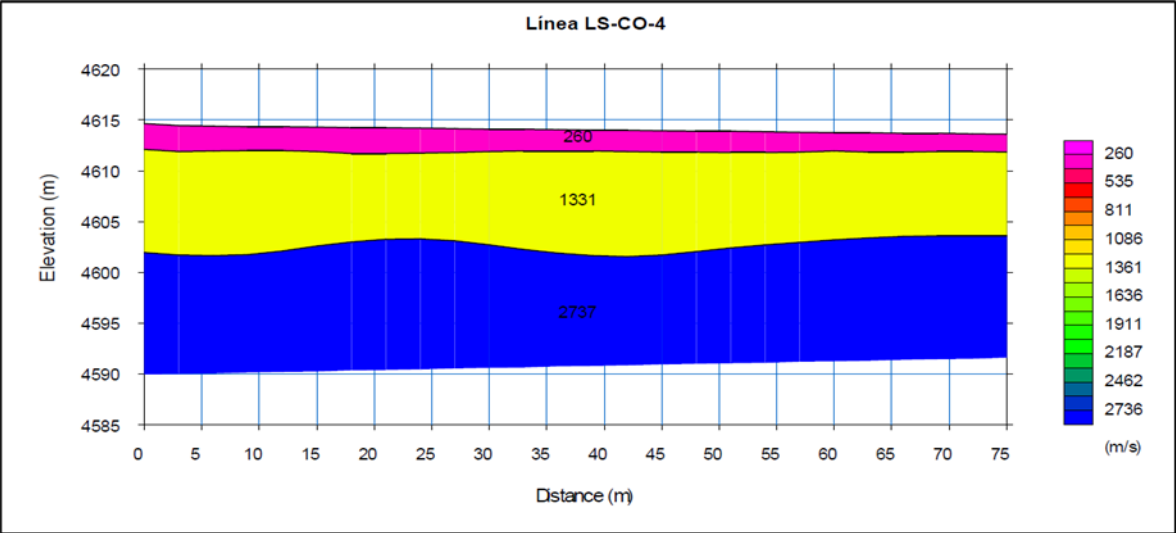
Perfil Sísmico 1 – 1



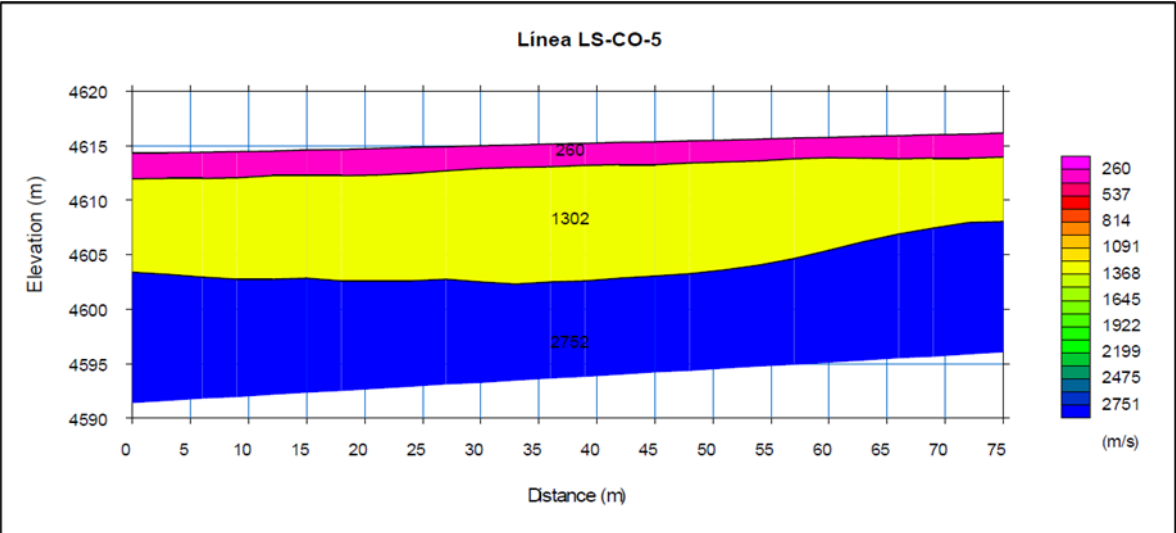
Perfil Sísmico 2 – 2



Perfil Sísmico 3 – 3

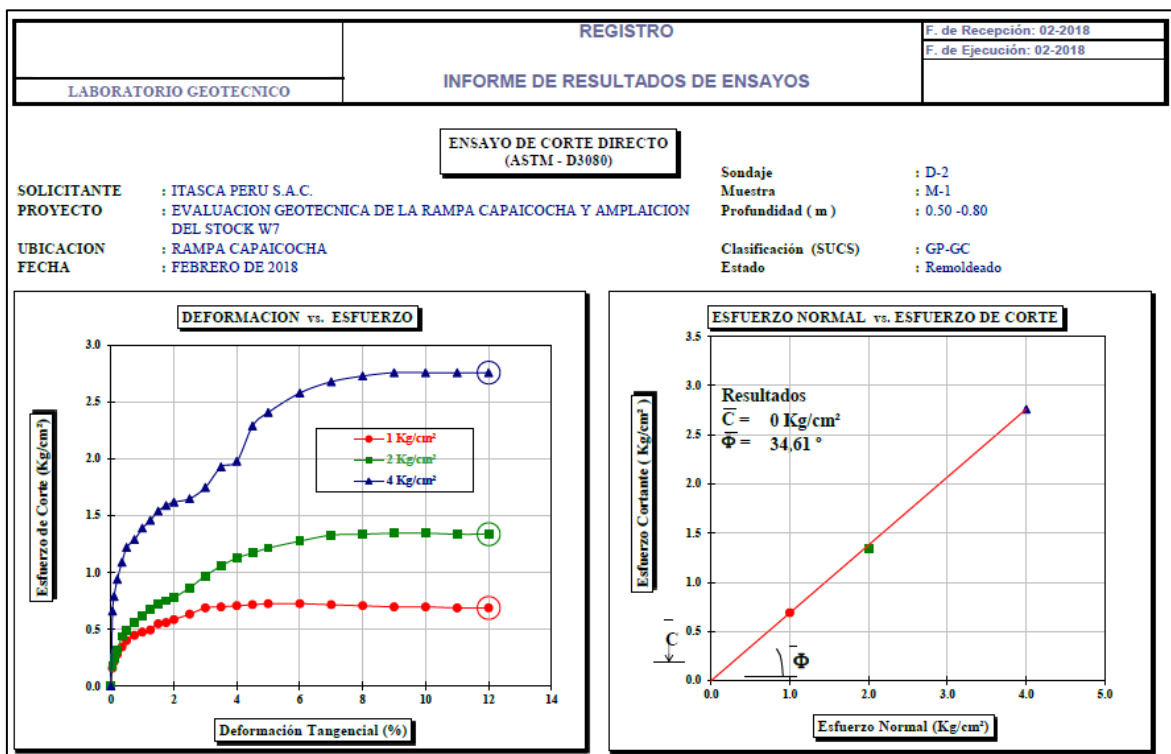
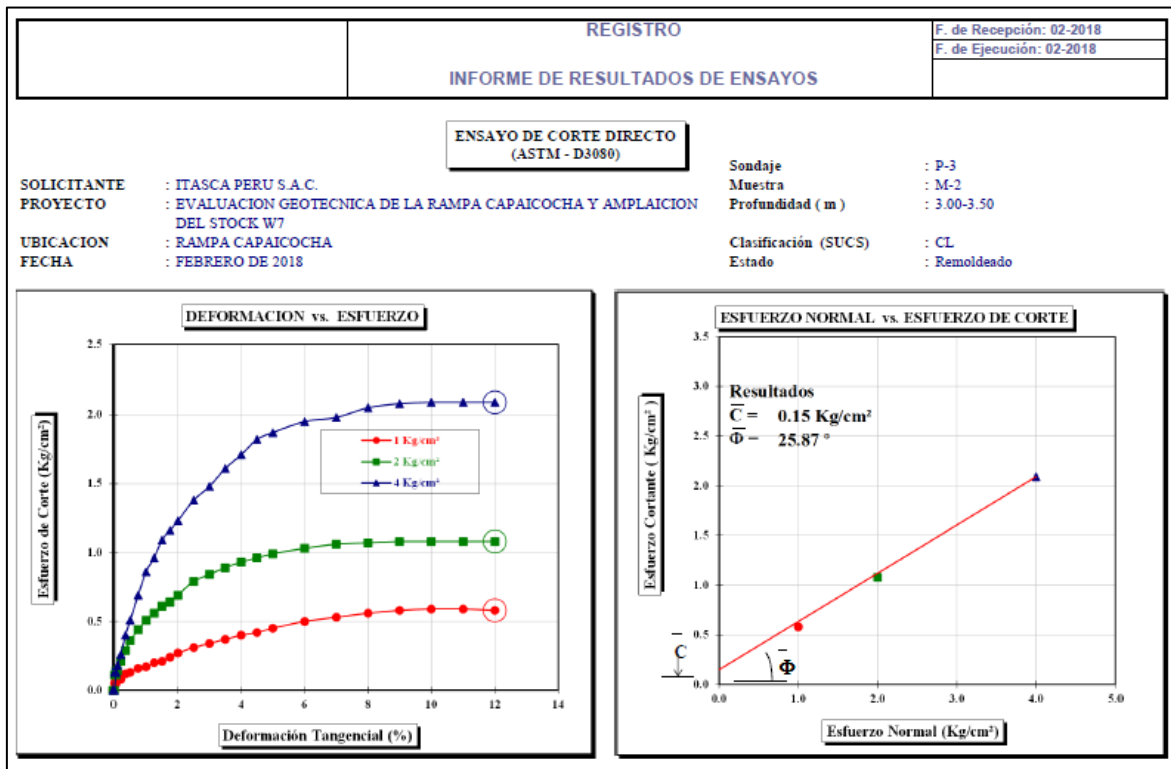


Perfil Sísmico 4 – 4

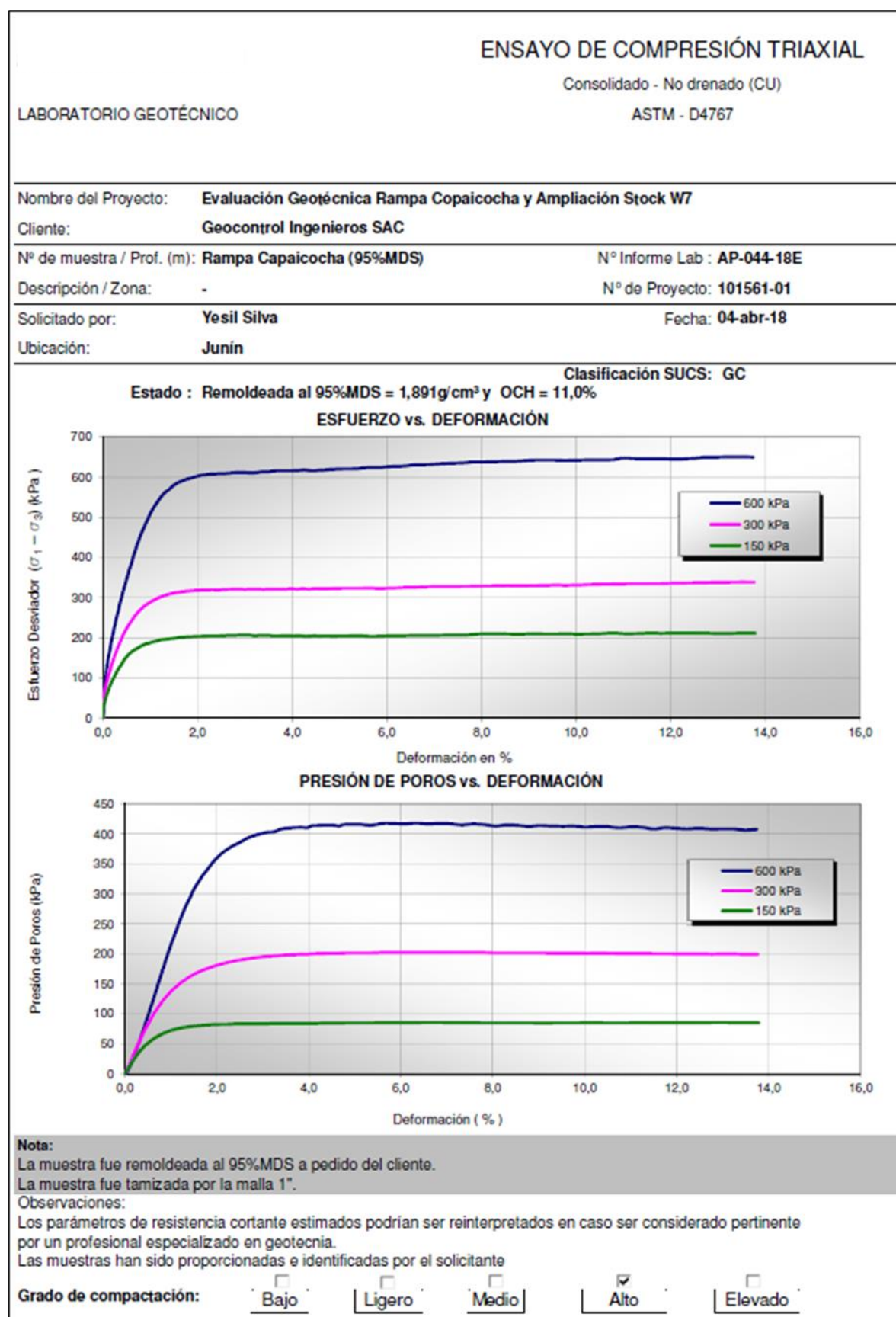


Perfil Sísmico 5 – 5

Anexo 5: Resultados de ensayos de corte directo



Anexo 6: Resultados de ensayos de compresión triaxial



ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado - No drenado (CU)

LABORATORIO GEOTÉCNICO

ASTM - D4767

Nombre del Proyecto: **Evaluación Geotécnica Rampa Copaicocha y Ampliación Stock W7**

Cliente: **Geocontrol Ingenieros SAC**

Nº de muestra / Prof. (m): **Rampa Capaicocha (95%MDS)**

Nº Informe Lab : **AP-044-18E**

Descripción / Zona: **-**

Nº de Proyecto: **101561-01**

Solicitado por: **Yesil Silva**

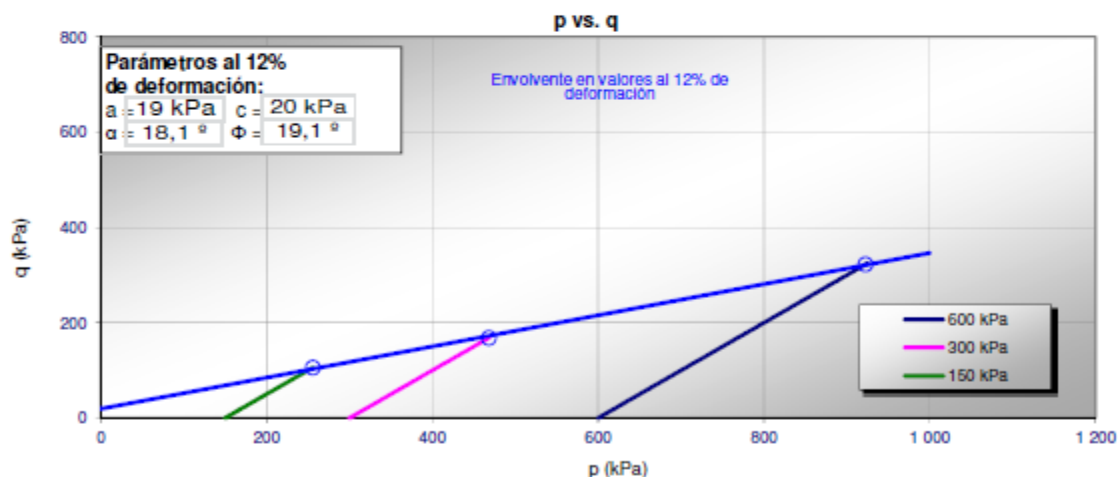
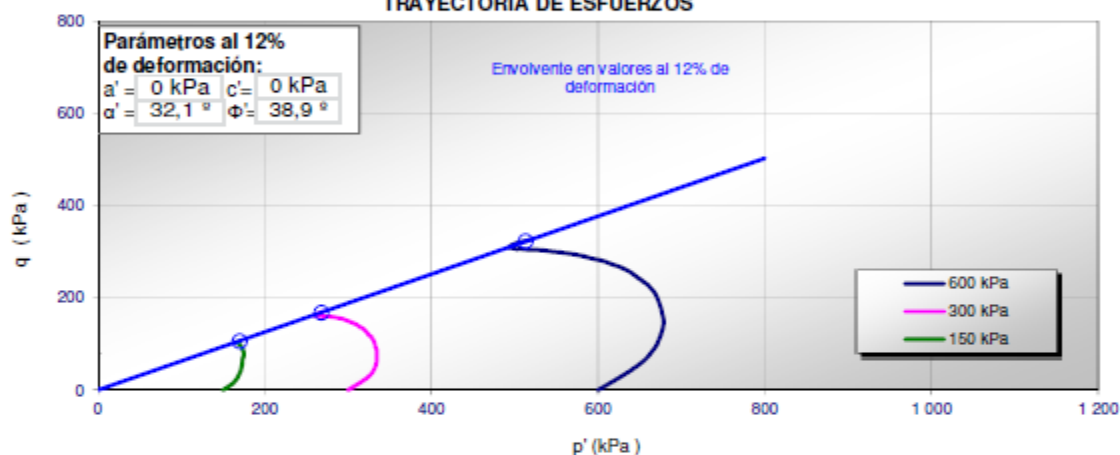
Fecha: **04-abr-18**

Ubicación: **Junín**

Clasificación SUCS: **GC**

Estado : Remoldeada al 95%MDS = 1,891g/cm³ y OCH = 11,0%

TRAYECTORIA DE ESFUERZOS



Nota:

La muestra fue remoldeada al 95%MDS a pedido del cliente.

La muestra fue tamizada por la malla 1".

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo

☒ Ligero

☐ Medio

☐ Alto

☐ Elevado

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado - No drenado (CU)

ASTM - D4767

LABORATORIO GEOTÉCNICO

Nombre del Proyecto: **Evaluación Geotécnica Rampa Copaicocha y Ampliación Stock W7**

Cliente: **Geocontrol Ingenieros SAC**

Nº de muestra / Prof. (m): **Rampa Capaicocha**

Nº Informe Lab : **AP-044-18E**

Descripción / Zona: **-**

Nº de Proyecto: **101561-01**

Solicitado por: **Yesil Silva**

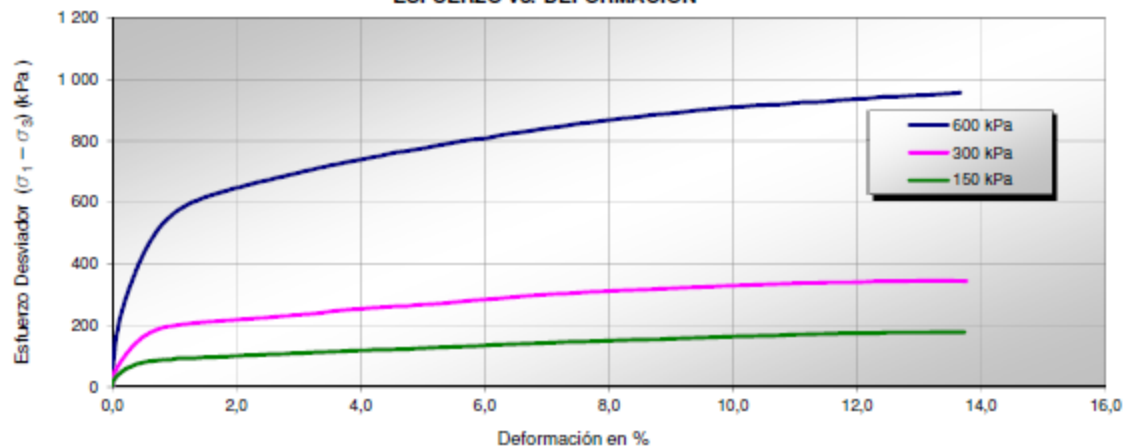
Fecha: **23-mar-18**

Ubicación: **Junín**

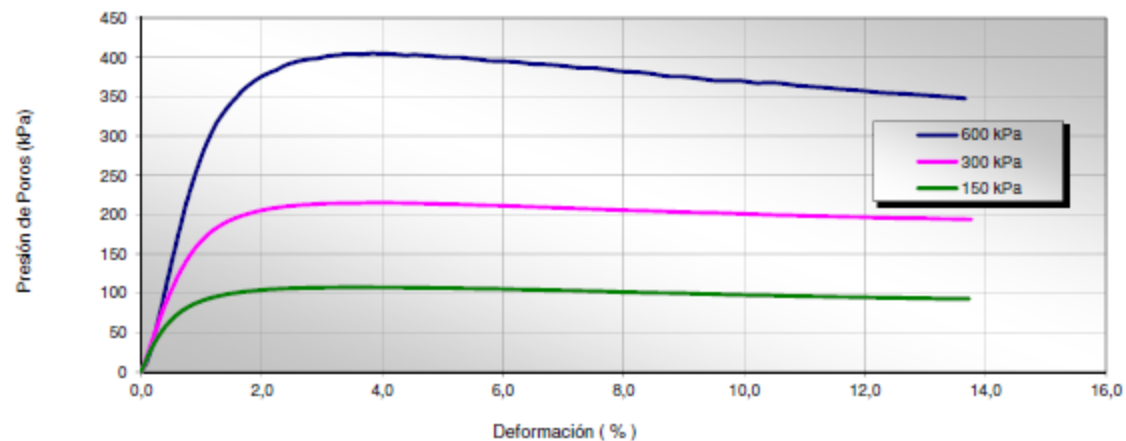
Clasificación SUCS: **GC**

Estado : Remoldeada a Densidad Seca = 1,772g/cm³ y %w = 4,4%

ESFUERZO vs. DEFORMACIÓN



PRESIÓN DE POROS vs. DEFORMACIÓN



Nota:

La muestra fue instalada al volteo a pedido del cliente.

La muestra fue tamizada por la malla 1".

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:



Bajo



Ligero



Medio



Alto



Elevado

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Consolidado - No drenado (CU)

ASTM - D4767

LABORATORIO GEOTÉCNICO

Nombre del Proyecto: **Evaluación Geotécnica Rampa Copaicocha y Ampliación Stock W7**

Cliente: **Geocontrol Ingenieros SAC**

Nº de muestra / Prof. (m): **Rampa Capaicocha**

Nº Informe Lab : **AP-044-18E**

Descripción / Zona: **-**

Nº de Proyecto: **101561-01**

Solicitado por: **Yesil Silva**

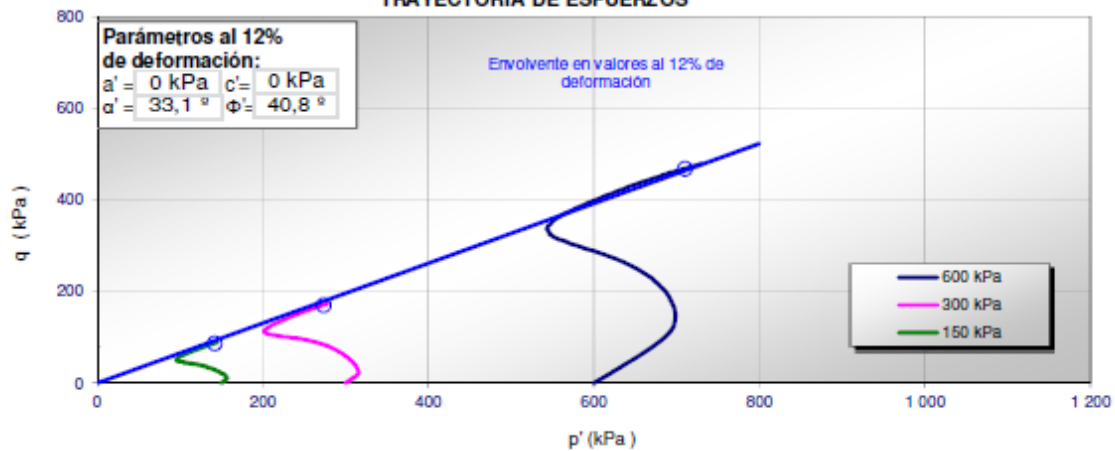
Fecha: **23-mar-18**

Ubicación: **Junín**

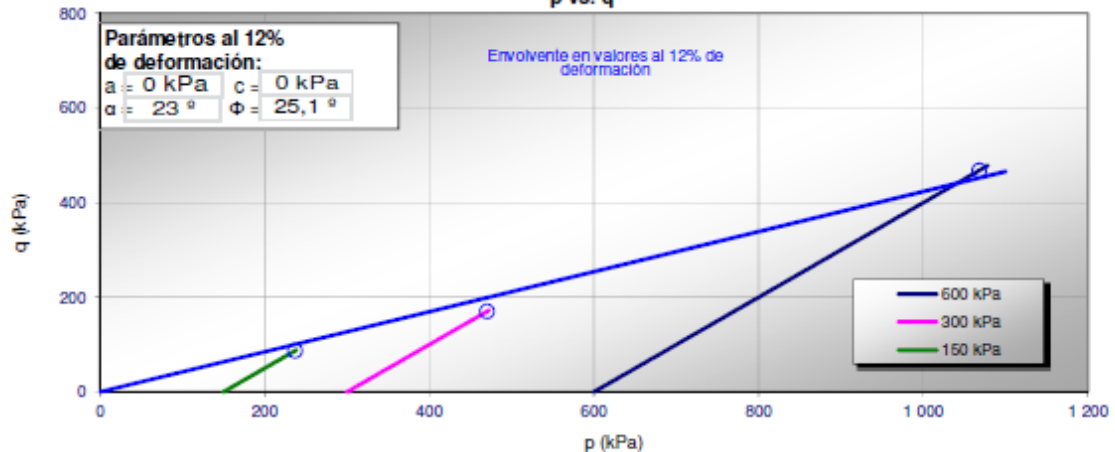
Clasificación SUCS: **GC**

Estado : Remoldeada a Densidad Seca = $1,772\text{g/cm}^3$ y $\%w = 4,4\%$

TRAYECTORIA DE ESFUERZOS



p vs. q



Nota:

La muestra fue instalada al volteo a pedido del cliente.

La muestra fue tamizada por la malla 1".

Observaciones:

Los parámetros de resistencia cortante estimados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional especializado en geotecnia.

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante

Grado de compactación:

☐ Bajo

☒ Ligero

☐ Medio

☐ Alto

☐ Elevado

Anexo 7: Resultados de análisis químico de suelos

	REGISTRO	F. Recepción:	27.02.2018																								
		F. Ejecución:	05.03.2018																								
LABORATORIO GEOTECNICO	INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO																										
ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS N.T.P 339.152, 339.176, 339.177, 339.178																											
PROYECTO : EVALUACIÓN GEOTECNICA DE LA RAMPA CAPAICOCHA Y LA AMPLIACIÓN DEL STOCK W7.																											
SOLICITADO : ITASCA PERU S.A.C.																											
UBICACION : Rampa Capaicocha - Chinalco - Yauli - Junin.																											
FECHA : Marzo - 2018																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>N° Muestra</th> <th>Descripción Suelo</th> <th>S.S.T. (ppm)</th> <th>Cl⁻ (ppm)</th> <th>SO₄²⁻ (ppm)</th> <th>pH</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P - 1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>M - 2</td> <td>MH</td> <td>1502.00</td> <td>36.00</td> <td>1326.00</td> <td>6.80</td> </tr> <tr> <td colspan="6">Prof.: 1.00 - 2.00 m</td> </tr> </tbody> </table>				N° Muestra	Descripción Suelo	S.S.T. (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	pH	P - 1						M - 2	MH	1502.00	36.00	1326.00	6.80	Prof.: 1.00 - 2.00 m					
N° Muestra	Descripción Suelo	S.S.T. (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	pH																						
P - 1																											
M - 2	MH	1502.00	36.00	1326.00	6.80																						
Prof.: 1.00 - 2.00 m																											
TABLAS NORMATIVAS CUADRO COMPARATIVO DE CONTENIDO DE SULFATOS Y SU GRADO DE AGRESIVIDAD AL CONCRETO SEGÚN DIFERENTES NORMAS Y REGLAMENTOS (Valores expresados en ppm)																											
ACI - 201.2R.77			BRS DIGEST (SEGUNDA SERIE) 90 (inglesa)		DIN 4030 (Alemana)	R.N.C. (Peruana)																					
Grado de Ataque	Sulfatos en el suelo	Sulfatos en el Agua	Sulfatos en el Suelo	Sulfatos en el Agua	Sulfatos	Sulfatos																					
Leve	0-1,000	0-150	<2,400	<360	0 - 600	50																					
Moderado	1,000-2,000	150-1,500	2,400-6,000	360-1440	600 - 3,000	--																					
Severo	2,000-20,000	1,500-10,000	6,000-24,000	1,440-8,000	>3,000	--																					
Muy Severo	>20,000	>10,000	>24,000	>8,000	--	--																					
Los valores máximos tolerables recomendados en nuestro medio, en comparación con los del agua potable, expresados en partes por millón (ppm)																											
Referencias		MTC	RIVVA 5	Agua Potable																							
Sustancia																											
Cloruros		300	300	250																							
Sulfatos		300	50	50																							
Sales Solubles Totales		1 500	300	300																							
Sales en Magnesio		--	125	125																							
Sólidos en Suspensión		1 000	10	10																							
pH		< de 7	> de 8	10.5																							
Mat. Orgánica expres. en Oxígeno		16	0.001	0.001																							
* Para concretos que han de estar expuestos a ataques por sulfatos																											

	REGISTRO	F. Recepción:	27.02.2018
		F. Ejecución:	05.03.2018
LABORATORIO GEOTECNICO	INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO		
ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS N.T.P 339.152, 339.176, 339.177, 339.178			

PROYECTO : EVALUACIÓN GEOTECNICA DE LA RAMPA CAPAICOCHA Y LA AMPLIACIÓN DEL STOCK W7.

SOLICITADO : ITASCA PERU S.A.C.

UBICACION : Rampa Capaicocha - Chinalco - Yauli - Junin.

FECHA : Marzo - 2018

N° Muestra	Descripción Suelo	S.S.T. (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	pH
D - 2 M - 1 Prof.: 0.00 - 1.00 m	GC	1820.00	53.00	870.00	7.20

TABLAS NORMATIVAS

CUADRO COMPARATIVO DE CONTENIDO DE SULFATOS Y SU GRADO DE AGRESIVIDAD AL CONCRETO
SEGÚN DIFERENTES NORMAS Y REGLAMENTOS
(Valores expresados en ppm)

ACI - 201.2R.77			BRS DIGEST (SEGUNDA SERIE) 90 (inglesa)		DIN 4030 (Alemana)	R.N.C. (Peruana)
Grado de Ataque	Sulfatos en el suelo	Sulfatos en el Agua	Sulfatos en el Suelo	Sulfatos en el Agua	Sulfatos	Sulfatos
Leve	0-1,000	0-150	<2,400	<360	0 - 600	50
Moderado	1,000-2,000	150-1,500	2,400-6,000	360-1440	600 - 3,000	--
Severo	2,000-20,000	1,500-10,000	6,000-24,000	1,440-6,000	>3,000	--
Muy Severo	>20,000	>10,000	>24,000	>6,000	--	--

Los valores máximos tolerables recomendados en nuestro medio, en comparación con los del agua potable,
expresados en partes por millón (ppm)

Referencias	MTG	RIVVA 5	Agua Potable
Sustancia			
Cloruros	300	300	250
Sulfatos	300	50	50
Sales Solubles Totales	1 500	300	300
Sales en Magnesio	--	125	125
Sólidos en Suspensión	1 000	10	10
pH	< de 7	> de 8	10.5
Mat. Orgánica expres. en Oxígeno	16	0.001	0.001

* Para concretos que han de estar expuestos a ataques por sulfatos