

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“ESTABILIDAD FÍSICA DEL DEPÓSITO DE RELAVES:  
RELAVERAS ANTIGUAS, DE LA UNIDAD MINERA  
PUCARRAJO - HUALLANCA, ANCASH - 2024”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título  
profesional de:  
Ingeniero Civil

## **Autores:**

Aaronm Mauro Leonardo Mallqui Salas  
Pamela Alexandra Sanchez Choquechambi

Asesor:

Mg. Ing. Neicer Campos Vasquez  
<https://orcid.org/0000-0003-1508-6575>

Lima - Perú

2024

## INFORME DE SIMILITUD

TSP\_MALLQUI SALAS AARONM, SANCHEZ CHOQUECHAMBI  
PAMELA

### ORIGINALITY REPORT

<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	<b>7%</b>
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

### PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<b>Submitted to Universidad Ricardo Palma</b> Student Paper	<b>1%</b>
<b>2</b>	<b>gicaperu.com</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>3</b>	<b>hdl.handle.net</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>fdocuments.net</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>Submitted to Universidad Privada del Norte</b> Student Paper	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b> Student Paper	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización</b> Student Paper	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>repositorio.unp.edu.pe</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mi papá Juan Leonardo, también a nuestras madres que han sido el mejor ejemplo de superación en todos estos años, finalmente me la dedico a mi por todo el esfuerzo realizado en mis 5 años de carrera universitaria.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradecer a Dios por la oportunidad que nos brindó de poder concluir con esta etapa de nuestra vida, también agradecidos con nuestros padres, abuelos, hermanos y con nosotros mismos por el apoyo emocional en nuestra trayectoria profesional.

**Tabla de contenidos**

<b>INFORME DE SIMILITUD .....</b>	<b>2</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA .....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	Tipos de deslizamiento .....	19
TABLA 2	Coordenadas de ubicación del área de estudio .....	39
TABLA 3	Resumen de coeficiente sísmico .....	45
TABLA 4	Estación pluviométrica de la zona de estudio .....	46
TABLA 5	Registro de precipitación máxima.....	47
TABLA 6	Precipitación extrema para diferentes periodos de retorno.....	47
TABLA 7	Valores de periodo de retorno (T) en años.....	49
TABLA 8	Perforaciones geotécnicas ejecutadas - TRANSLUMASA.....	50
TABLA 9	Perforaciones geotécnicas ejecutadas – COINGEC Noviembre 2922 .....	52
TABLA 10	Resumen de resultados de los ensayos de penetración estándar (SPT) .....	54
TABLA 11	Resumen de ensayos de penetración ligera (DPL).....	55
TABLA 12	Ubicación de los ensayos MASW 2D .....	56
TABLA 13	Ubicación de los ensayos de tomografía eléctrica .....	56
TABLA 14	Resumen de ensayo MASW 2D .....	57
TABLA 15	Resumen de ensayo de clasificación de suelos .....	62
TABLA 16	Resumen de ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) .....	63
TABLA 17	Resumen de ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado .....	64
TABLA 18	Resumen de ensayos de carga puntual .....	64
TABLA 19	Clasificación de la presa .....	68
TABLA 20	Definición de periodos de retorno de lluvia y sismo .....	69
TABLA 21	Fuentes de criterios de diseño.....	69
TABLA 22	Criterios de diseño .....	70
TABLA 23	Resumen de los parámetros de resistencia cortante .....	71
TABLA 24	Mínimos factores de seguridad requeridos .....	72
TABLA 25	Resumen de resultados del análisis de estabilidad física .....	74
TABLA 26	Volumen de corte.....	76
TABLA 27	Características de los contrafuertes .....	76
TABLA 28	Cantidad de geosintéticos utilizados en el sistema de revestimiento .....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> Organigrama de la empresa COINGEC SAC .....	<b>11</b>
<b>FIGURA 2</b> Conformacion de un talud .....	<b>17</b>
<b>FIGURA 3</b> Elementos de un movimiento en masa .....	<b>18</b>
<b>FIGURA 4</b> Desprendimiento de rocas .....	<b>20</b>
<b>FIGURA 5</b> Vuelco de rocas.....	<b>20</b>
<b>FIGURA 6</b> Modos de falla en deslizamiento.....	<b>22</b>
<b>FIGURA 7</b> Deslizamientos laterales .....	<b>23</b>
<b>FIGURA 8</b> Flujo de escombros (Debris Flow) .....	<b>23</b>
<b>FIGURA 9</b> Clasificación general de los métodos de cálculo de estabilidad.....	<b>26</b>
<b>FIGURA 10</b> Vista en planta de la ubicación de las relaveras antiguas .....	<b>40</b>
<b>FIGURA 11</b> Elementos de cobertura de cierre .....	<b>78</b>

## RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de suficiencia profesional tiene como objetivo describir la experiencia profesional obtenida en la ejecución del proyecto Ingeniería de estabilización física de Relaveras Antiguas, Huallanca - Ancash, en donde desarrollamos el cargo de supervisores de campo para la empresa Consultores en Ingeniería Geotécnica Estructural y Construcción S.A.C.

Para la realización del informe final del proyecto nos encargamos de la etapa preliminar de revisión de información, la supervisión de la ejecución de investigaciones geotécnicas realizadas en la zona de estudio, y el manejo de softwares como AutoCad, Civil 3D y Slide para el procesamiento e interpretación de datos para la obtención de resultados finales.

Se identifico como problemática la falta de información existente de la zona de estudio, ya que dentro de los documentos enviados por parte de Nyrstar Ancash, empresa instalada actualmente en la Unidad Minera Pucarrajo, se encontró mucha información irrelevante o contradictoria, llevando esto a múltiples revisiones de información sobre el diseño y construcción de la relavera.

Reuniendo toda la información y los trabajos realizados en campo y gabinete, se obtuvo resultados favorables de estabilidad física para dicha relavera, indicando que en la última etapa los factores de seguridad son mayores a los mínimos indicados en los criterios de diseño geotécnico, concluyendo que las estructuras analizadas presentan condiciones favorables de estabilidad física para las condiciones estáticas y pseudoestáticas de cierre evaluadas.

**Palabras Clave:** Estabilidad física, factor de seguridad, condición estática y pseudoestática

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **Descripción de la empresa**

COINGEC S.A.C. inicio sus operaciones en el año 2008, comandado por el gerente general Leonardo Rodin Salas Cachay, además de profesionales de vasta experiencia en el desarrollo de proyectos para la industria minera en el Perú y otros países de la región como Chile, Argentina, Brasil, Colombia y México.

La experiencia de la empresa y en particular del personal, incluye la participación en el desarrollo de proyectos de presas de relaves y depósitos de materiales excedentes, diseño de cierre de componentes mineros y estudios geotécnicos con fines de cimentación y a todo nivel para diversas instalaciones mineras en el Perú.

Los profesionales de la empresa han contribuido con la minería peruana y en diversos mineros y de infraestructura del país, proponiendo e implementando una serie de mejoras en el diseño, construcción y operación de las instalaciones bajo diversas condiciones del clima y altitud.

### **Misión de la empresa**

Proporcionar soluciones geotécnicas de manera práctica, efectiva y eficiente, con altos estándares de calidad, compromiso e innovación y el cuidado del medio ambiente, generando con ello valor y confianza a los clientes.

### **Visión de la empresa**

Ser una empresa consultora peruana líder y prestigiosa en la aplicación creativa e innovadora de las ciencias e ingeniería y además ser reconocidos por la excelencia de los servicios y rapidez en las respuestas, con el soporte de un excelente equipo profesional comprometido con la empresa.

### **Valores de la empresa**

- Compromiso

- Integridad
- Trabajo en equipo
- Innovación
- Confianza
- Excelencia
- Flexibilidad
- Empoderamiento

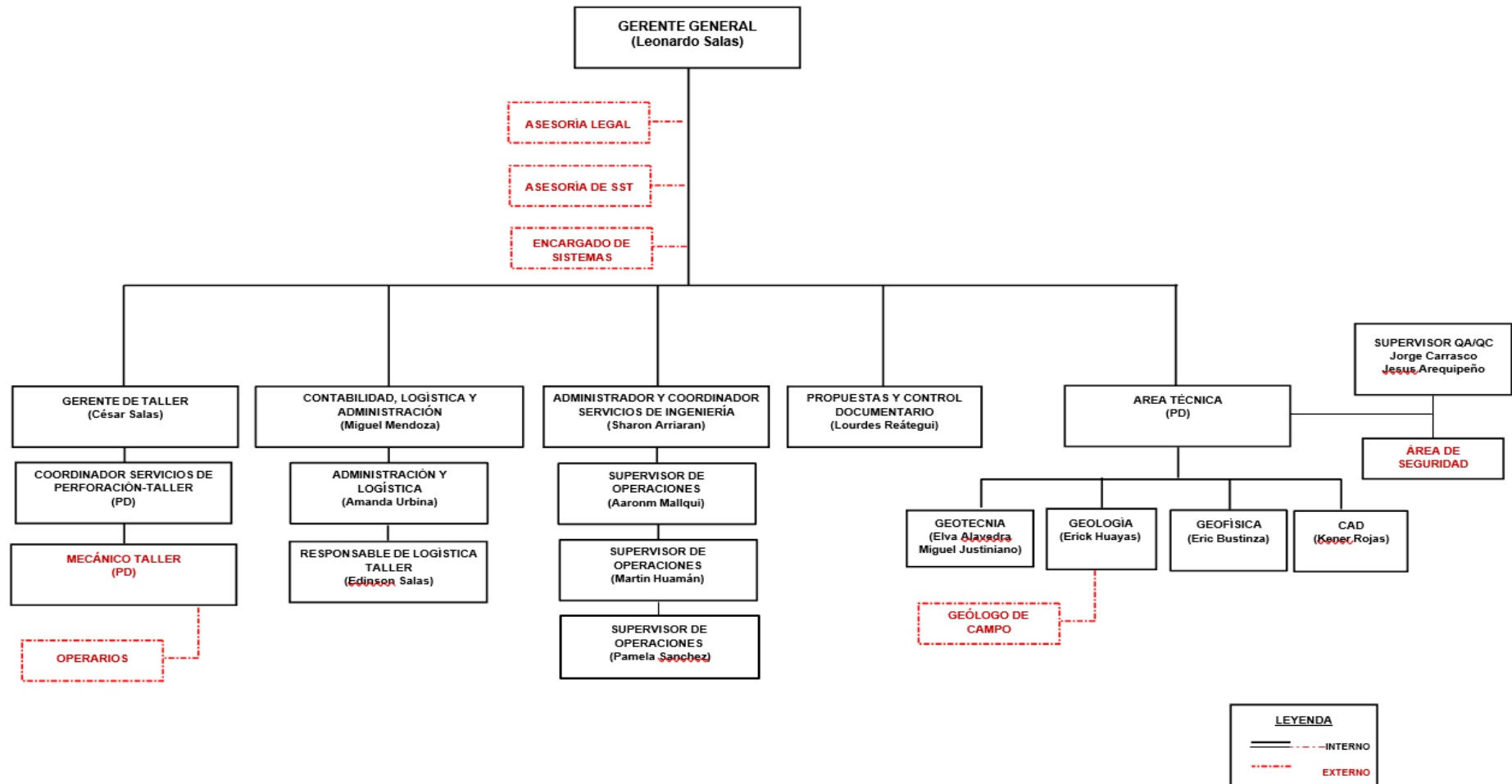
### **Responsabilidad Social de la empresa**

Actualmente la legislación minera del país persigue como objetivo para afianzar, que cualquier proyecto minero que se inicie o reinicie, abarque dentro de su concepción empresarial y diseño de ingeniería todos los mecanismos, normas y dispositivos que se requieran para prevenir o mitigar cualquier impacto ambiental que pueda afectar al ecosistema colindante y que sus descargas cumplan con los Niveles Máximos Permisibles (NMP) establecidos por la Ley.

Es por ello que COINGEC S.A.C. tiene profesionales orientados y capacitados en la preservación y el cuidado del medio ambiente, contando con políticas de cultura verde y planes de manejo ambiental que permitan mitigar los posibles daños que pueda generar nuestros trabajos.

Figura N°01:

Organigrama de la empresa COINGEC S.A.C



Nota: organigrama actualizado de COINGEC S.A.C

## Descripción del organigrama

### Área técnica

Nuestra área técnica proporciona la calidad y seguridad de la estabilidad física de un proyecto de ingeniería que se ofrecen a los clientes. Además, priorizar que para el diseño se haya tomado en cuenta la practicidad y economía para construirse.

Particularmente, la aplicación de estándares nacionales e internacionales, así como el sustento técnico que requiere el cliente para la construcción, operación segura y eficiente de las estructuras proyectadas.

Además de realizar en el diseño, también se realiza la ejecución y supervisión de las investigaciones geotécnicas requeridas y necesarias para brindar el sustento adecuado tales como: calicatas, perforaciones geotécnicas, ensayos SCPTu, ensayos SPT y LPT, entre otros.

Asimismo, se cuenta con un área de geofísica que de igual manera realiza la ejecución y supervisión de las investigaciones geofísicas para brindar el soporte complementario a las investigaciones geotécnicas que realizamos.

Poseer experiencia en ingeniería geotécnica nos complementa para el diseño y construcción de depósitos de relave, depósitos de desmonte y plantas mineras.

#### A. Investigaciones de campo y laboratorio

- Investigaciones geotécnicas - geológicas de campo.
- Supervisión de perforaciones diamantinas
- Ejecución de ensayos DPL, SPT, LPT, CPT, muestreo de suelos y rocas.
- Supervisión de ensayos de permeabilidad Lugeon y Lefranc
- Identificación, evaluación, muestreo y estudio de canteras.
- Ensayos de laboratorio e interpretación de resultados.

- Diseño y supervisión de instrumentación geotécnica: piezómetros hidráulicos y de cuerda vibrante, inclinómetros, celdas de presión de cuerda vibrante, sensores de asentamiento, entre otros.

## **B. Análisis geotécnico**

- Análisis geotécnicos con fines de cimentación de todo tipo de instalaciones civiles y mineras: plantas, chancadoras, instalaciones auxiliares, puentes, edificaciones, carreteras, entre otros.
- Análisis de estabilidad física de depósitos de relaves, presas de agua, depósitos de desmonte, material inadecuado (DMI) y orgánico (DMO).
- Análisis de estabilidad física en 2D y 3D de taludes.
- Estudios del potencial de licuación de suelos naturales.
- Análisis y diseño de remediación y estabilización de taludes.
- Diseño y análisis de muros de suelo reforzado, gaviones y reforzamiento con pernos de anclaje.

## **Realidad Problemática**

Uno de los principales residuos producto de la explotación minera son los relaves, es por ello que para almacenar estos residuos se diseñan obras de ingeniería que ayuden a contenerlos por un tiempo indeterminado, ya sea durante la etapa de operación hasta que el ciclo de la vida de la mina concluya, estas estructuras tendrán que mantenerse en pie evitando que ocurra el derrame de los residuos que contienen y consecuentemente afectando a la vida, la salud y el medio ambiente.

Los depósitos de relaves convencionales son las estructuras que disponen un mayor riesgo potencial de afectación, esto es por las características de los materiales que se almacenan, el

método y material de construcción del dique de contención, además que generalmente se construyen en altas cordilleras, cuencas de ríos o quebradas.

Ante un posible escenario de falla o colapso de la misma, una cantidad del relave es desatado a través de una brecha y el resultado es parecido a un deslizamiento de terreno junto con el flujo de lodos embalsados tomando grandes velocidades de desplazamiento afectando extensas áreas. En los últimos años se han visto diversos casos de derrame de relaves que traen consigo consecuencias devastadoras, el último de ellos ocurrió en Brasil, estado de Brumadinho, en la mina Córrego do Feijão, donde el colapso de un depósito de relaves, dejó un saldo de al menos 186 fallecidos y 122 desaparecidos (The New York Times 2019), dicha tragedia ocurrió el 25 de enero del 2019. Por el cual, se tiene una preocupación por el aseguramiento y control de la estabilidad física de depósitos de relaves. La unidad minera Pucarrajo dejó de operar en el año 2008, muchos años después exactamente en el 2019 reanudaron actividades iniciando el proceso de cierre de sus componentes mineros, dentro de ello sus presas de relaves como es las Relaveras Antiguas.

Ante un posible colapso del dique del depósito y derrame de los materiales que contiene, se produciría un serio problema socioambiental ya que la distancia para recorrer podría llegar a la zona baja de la quebrada sopas en la hondonada de las pozas de tratamiento de agua además de pérdidas de áreas de trabajo estacional, o rutas de transporte de uso frecuente.

Para este fin, se ha previsto la elaboración del estudio definitivo del proyecto “Ingeniería de Estabilización Física - Relaveras Antiguas para la Unidad Minera Pucarrajo”, cuyo objetivo es desarrollar el estudio geotécnico con fines de estabilización física para llevar a cabo el cierre final del depósito de relaves – Relaveras Antiguas.

### **Antecedentes**

Huamán (2018). Análisis de estabilidad física del depósito de relaves Manalave para su recrecimiento vertical con relave en pasta. Nos dice que en la actualidad en la minería

peruana el proceso de disposición de relaves, desde el tradicional relave en pulpa, espesado, en pasta y filtrado, se inició con los relaves producidos por flotación y lixiviación, extrayendo arenas muy finas y partículas sumamente pequeñas (lamas); sin embargo en aquellos tiempos cuando se inició la minería las formas de disposición no eran las ideales (se vertía al río y lechos de lago); debido a ello empíricamente se dio inicio a la ejecución de la construcción de depósitos de relaves con el método hoy conocido como “aguas arriba”. A causa de fallas en depósitos de relave dispuestos con este método, se tuvo la necesidad de cambiar el método de construcción al conocido como “aguas abajo”, con lo cual se mejoró la estabilidad de los depósitos de relave.

También comenta que se tuvo experiencias de fallas de presas de relaves por eventos sísmicos, en el Perú en el año 1952 ocurrió la falla del depósito Casapalca - CENTROMIN, a partir de entonces se tiene información de depósitos afectados por eventos sísmicos, por efecto de la licuación del material ante la presencia de movimiento sísmico y la saturación del relave; ante dichos eventos y el avance de la tecnología, se viene implementando el proceso de disposición de relaves con contenido de agua cada vez menores, más densidad y mayor concentración de sólidos. Dichas características ayudan a mejorar la estabilidad de los depósitos de relaves; además, estos tipos de disposición generan mejores condiciones geotécnicas.

### **Formulación del problema**

La empresa privada Nyrstar Peru S.A. tiene la obligación de efectuar el cierre final del depósito de relaves para asegurar su estabilidad física en el corto y largo plazo teniendo como finalidad evitar un derrame de relaves que afectarían a las personas y medio ambiente.

Ante esta situación y haciendo relevante la realidad problemática a la que se enfrenta Nyrstar Peru S.A., nos realizamos la siguiente pregunta:

## **¿Cómo garantizar la estabilidad física en el corto y largo plazo de manera óptima para que se efectuó el cierre final del depósito de relaves – Relaveras Antiguas?**

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Garantizar la estabilidad física en el corto y largo plazo de modo que se lleve a cabo el cierre final del depósito de relaves – Relaveras Antiguas.

#### **Objetivos Específicos**

- Identificar las propiedades geotécnicas, geomecánicas y geofísicas del depósito de relaves
- Clasificar la presa según los mecanismos de falla que afectan al depósito de relaves
- Desarrollar el análisis simplificado de desplazamientos permanentes por sismo
- Realizar el análisis de estabilidad física por el método de equilibrio limite en condiciones actuales y a largo plazo
- Realizar el diseño de obras complementarias que permitan mantener la estabilidad física en el largo plazo.

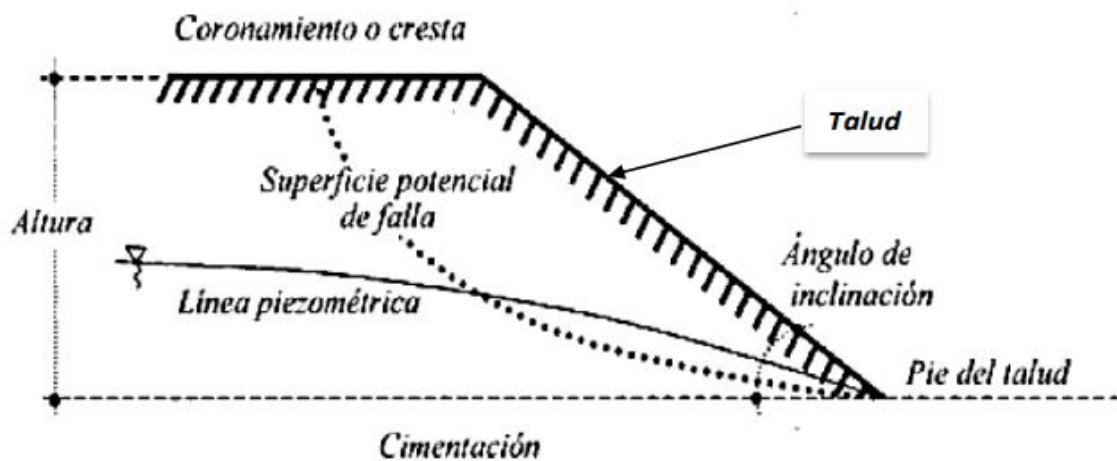
## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### Conceptos básicos de estabilidad de taludes

Se denomina talud a todo tipo de superficie inclinada que sobrepone un macizo de suelo, de rocas o de suelo y roca. Por lo general pueden ser naturales como las laderas o artificiales como los taludes de cortes y terraplenes. La figura N°02 muestra como está conformado un talud.

#### Figura N°02

*Conformación de un talud*



*Nota: La figura muestra terminologías usadas para describir un talud*

Para los estudios de estabilidad de taludes implican contundentemente condiciones relativas a la naturaleza de los materiales y agentes perturbadores, en su mayoría de naturaleza geológica, hidrológica y geotécnica por lo que generan una mayor complejidad, activando más retos para los especialistas de esta materia.

Para el diseño adecuado de una estructura geotécnica, se necesita que soporte las máximas fuerzas que puedan presentarse durante la vida útil de la estructura, para el cual dicha estructura debe cumplir bien su función, pero teniendo en cuenta un costo razonable. Además, ingresa la evaluación de estabilidad de la estructura que es cuantificada usando el llamado “factor de seguridad”.

## **Factor de seguridad**

El factor de seguridad o “FS” para un talud, se determina por lo general mediante la relación entre la resistencia al corte respecto del esfuerzo cortante sobre la superficie de falla crítica.

En la mayoría de suelos las características de esfuerzos y deformaciones se pueden presentar deformaciones plásticas parcialmente de gran tamaño en cuanto se aproximan a los esfuerzos cortantes aplicados a la resistencia al corte del material. Para el diseño de un talud, el factor de seguridad debe ser mayor a la unidad.

## **Movimiento de masa**

Un movimiento de masa (landslide), es un término usado por lo general para describir el movimiento que realizan los suelos y rocas cuesta abajo por efectos de la gravedad.

Las distintas denominaciones de movimientos de masas están asociadas con mecanismos específicos de falla del talud, así como las propiedades y características de los tipos de falla.

Existen otras frases o vocablos similares que son usados con el término “movimientos de masa”, incluyendo movimiento de masas, falla de taludes, etc, es por ello que el entendimiento de las partes básicas de un movimiento de masa típico es útil. En la siguiente figura se muestra la ubicación y términos usados más comunes para la descripción de las partes de un movimiento de masa.

## **Figura N°03**

*Elementos de un movimiento en masa*



*Nota: La figura muestra terminologías de elementos de un movimiento de masa*

### **Tipos básicos de movimientos de masa**

Los deslizamientos de tierra pueden ser clasificados en distintos tipos, en base al tipo de movimiento y al tipo de material involucrado. En resumen, la masa del material de un deslizamiento es roca o suelo (o ambos), el suelo es descrito como tierra (earth) si está compuesto de partículas del tamaño de arena o granos más finos, y debris, si está compuesto de fragmentos más gruesos. El tipo de movimiento describe la mecánica interna actual de como los deslizamientos de tierra se desplazan: Por desprendimiento, vuelco, deslizamiento, desplazamiento lateral o flujo. En consecuencia, los deslizamientos son descritos usando dos términos que hacen referencia respetivamente al material y al movimiento. Los movimientos de masa además pueden formar fallas complejas abarcando más de un tipo de movimiento. Algunas de las clasificaciones más extendidas (Varnes, 1984; Hutchinson, 1988).

### **Tabla N°01**

*Tipos de deslizamiento*

TIPO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL		
	LECHO ROCOSO	INGENIERÍA DE SUELOS	
		PREDOMINANTEMENTE GRUESO	PREDOMINANTEMENTE FINO
DESprendimientos	Caída de rocas	Caída de escombros	Caída de suelos
Vuelcos	Vuelco de rocas	Vuelco de escombros	Vuelco de suelo
DESlizamiento	Deslizamiento lateral de roca	Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de suelos
ROTACIONAL TRASLACIONAL			
DESplazamiento LATERAL	Deslizamientos laterales de roca	Deslizamientos laterales de escombros	Deslizamientos laterales de suelos
FLUJOS	Flujo de rocas (deep creep)	Flujo de escombros	Flujo de suelos
COMPLEJOS	Combinación de dos o más tipos de movimientos principales		

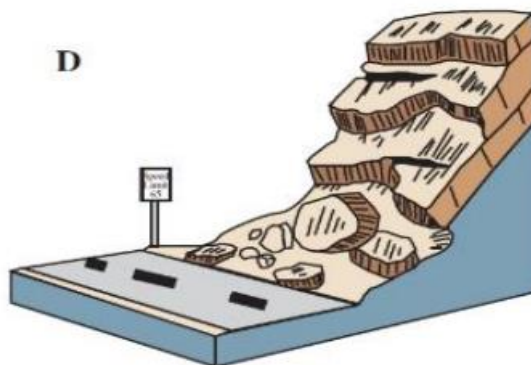
Nota: En la tabla observamos la versión abreviada de la clasificación de Varnes (1978).

### a. Desprendimientos

Son movimientos abruptos de masas de material geológico, tales como rocas y cantos rodados que se desprenden de pendientes empinadas o acantilados. La separación se produce a lo largo de discontinuidades tales como fracturas, juntas y planos estratificados y el movimiento se produce por caída libre, rebotando y rodando. Los desprendimientos son fuertemente influenciados por la gravedad, meteorización mecánica y la presencia de agua.

### Figura N°04

*Desprendimiento de rocas*



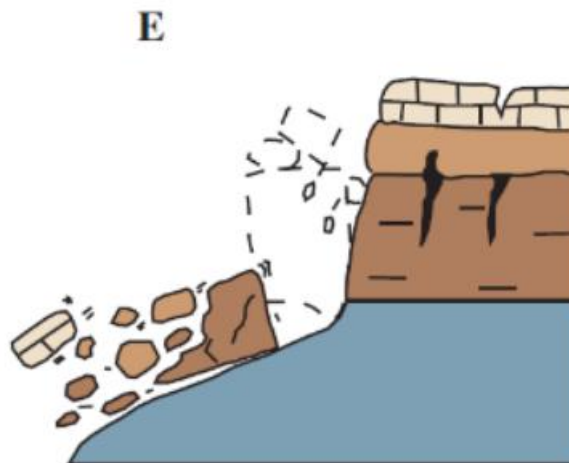
Fuente: US Geological Survey

### b. Vuelcos

Las fallas por vuelco se distinguen por el movimiento de rotación hacia delante de una serie de bloques o columnas verticales, de tal manera que estos giran a través de un punto fijo, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas.

### Figura N°05

*Vuelco de rocas*



*Fuente: US Geological Survey*

### c. Deslizamientos

Los deslizamientos son un tipo de fenómeno natural geológico, y pueden ser causados por factores como la erosión, la saturación del suelo por agua, la actividad sísmica, la deforestación, o la alteración del terreno debido a la construcción. Dependiendo de la magnitud y la ubicación, los deslizamientos pueden representar un riesgo significativo para la vida humana y la propiedad, especialmente en áreas con relieve abrupto o suelos inestables.

Este movimiento implica un desplazamiento en dirección cortante a lo largo de una o más superficies, que suelen encontrarse en zonas de espesor relativamente reducido. El deslizamiento puede ser gradual, es decir, no comienza al mismo tiempo a lo largo de toda la superficie de la falla. Estos desplazamientos pueden ser causados por fenómenos naturales o por la desestabilización de masas de tierra debido a actividades humanas

como cortes, rellenos o deforestación. La forma de la superficie de falla está determinada por características estructurales como fisuras, juntas, cargas aplicadas y la profundidad del estrato de roca o estrato resistente.

- **Deslizamiento rotacional**

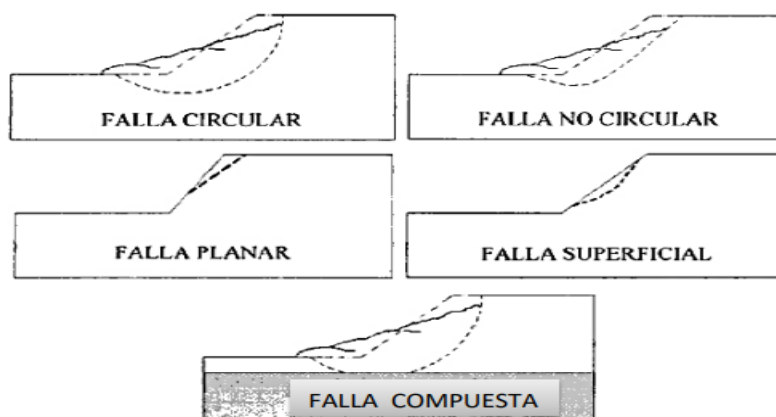
En muchos casos, los deslizamientos en laderas se producen cuando una masa de suelo se desplaza a lo largo de una superficie curvada. Por lo general, este tipo de falla, conocido como deslizamiento rotacional, se relaciona con suelos homogéneos y suele observarse en arcillas tanto débiles como duras, incluyendo las que están fisuradas y las rígidas que están intactas.

- **Deslizamiento traslacional**

Este tipo de movimiento se produce en superficies que son planas o ligeramente onduladas, y no implica rotación significativa ni volcadura. Se distingue por la existencia de una capa subsuperficial de alta resistencia. Cuando existe una capa relativamente más rígida a una profundidad considerable, el desplazamiento puede seguir una trayectoria curva hasta que se encuentre con esta capa resistente en un plano de contacto.

**Figura N° 06**

*Modos de falla en deslizamiento*



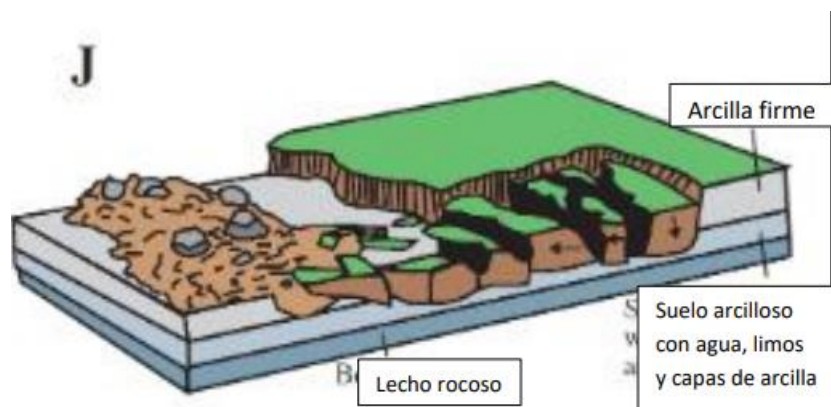
*Nota: Modos de falla en deslizamientos (Skempton & Hutchinson 1969).*

- **Desplazamientos laterales**

Los desplazamientos laterales se caracterizan por ocurrir típicamente en pendientes suaves o terrenos planos. Este movimiento se caracteriza principalmente por la extensión lateral acompañada de cortes o fracturas de tracción. La falla ocurre debido a la licuefacción, un proceso en el cual el suelo saturado, generalmente compuesto por arenas y limos, pierde cohesión y pasa de un estado sólido a uno líquido. Este tipo de falla puede desencadenarse por movimientos rápidos, como los ocurridos durante un terremoto, pero también puede ser inducido de manera artificial.

**Figura N°07**

*Deslizamientos laterales*



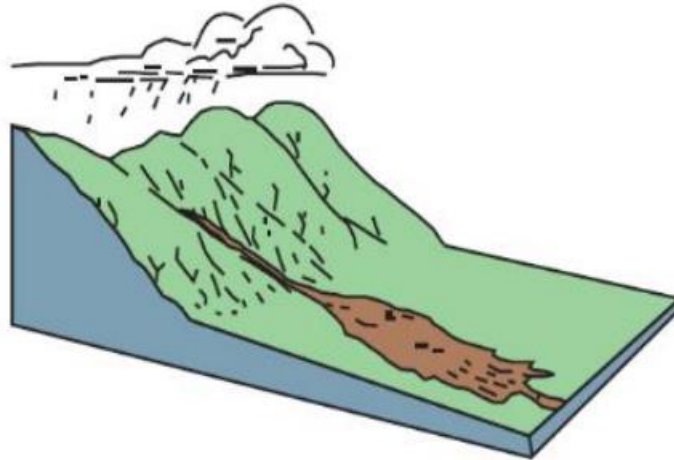
*Fuente: US Geological Survey*

**d. Flujos**

Los flujos son desplazamientos de masa de suelo que pueden consistir en barro o tierra, derrubios o bloques rocosos, y están notablemente saturados de agua. En estos eventos, el material se descompone y se comporta como un fluido, experimentando una deformación continua sin mostrar superficies de rotura claramente definidas. Es importante destacar que el agua juega un papel crucial como agente desencadenante debido a la reducción de la resistencia en materiales poco cohesivos.

**Figura N°08**

*Flujo de escombros (Debris Flow)*



*Fuente: US Geological Survey*

**Métodos de análisis de estabilidad de taludes**

El análisis de estabilidad de taludes en minería es crucial debido a las condiciones específicas y los riesgos asociados con las operaciones mineras.

**Geología y características del material**

En minería, los taludes suelen estar expuestos a condiciones geológicas complejas y variadas. Es fundamental comprender la geología del área, incluyendo la estructura geológica, la presencia de fallas y la naturaleza de los materiales que forman el talud (por ejemplo, rocas, suelos, relaves).

**Métodos de análisis específicos**

- **Método de las Fuerzas de Corte (Rebanadas):** Ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad considerando las discontinuidades geológicas y los diferentes tipos de materiales presentes en el talud minero.
- **Método de Equilibrio Limite y Variantes:** Adaptado para considerar las cargas dinámicas y las variaciones en la geometría del talud, especialmente

en áreas mineras donde se realizan actividades de excavación y voladura que pueden afectar la estabilidad.

### **Consideraciones de diseño y operación**

El diseño de taludes en minería debe considerar no solo la estabilidad a corto plazo durante la operación, sino también la estabilidad a largo plazo durante y después del cierre de la mina.

Las actividades de excavación, perforación, voladura y carga pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de los taludes, por lo que se deben implementar técnicas de monitoreo y gestión de riesgos adecuadas.

### **Instrumentación y Monitoreo**

La instrumentación geotécnica es fundamental para monitorear la deformación, los movimientos y las presiones de agua en los taludes mineros.

Se utilizan inclinómetros, extensómetros, piezómetros y otros dispositivos para detectar cambios en la estabilidad y tomar medidas preventivas o correctivas de manera oportuna.

### **Modelamiento numérico avanzado**

Los métodos de elementos finitos y otros modelos numéricos avanzados se utilizan para simular el comportamiento del talud bajo diferentes condiciones de carga y escenarios de falla.

Estos modelos permiten prever y evaluar el riesgo de falla en condiciones dinámicas y proporcionan información detallada para la toma de decisiones en la gestión de riesgos geotécnicos.

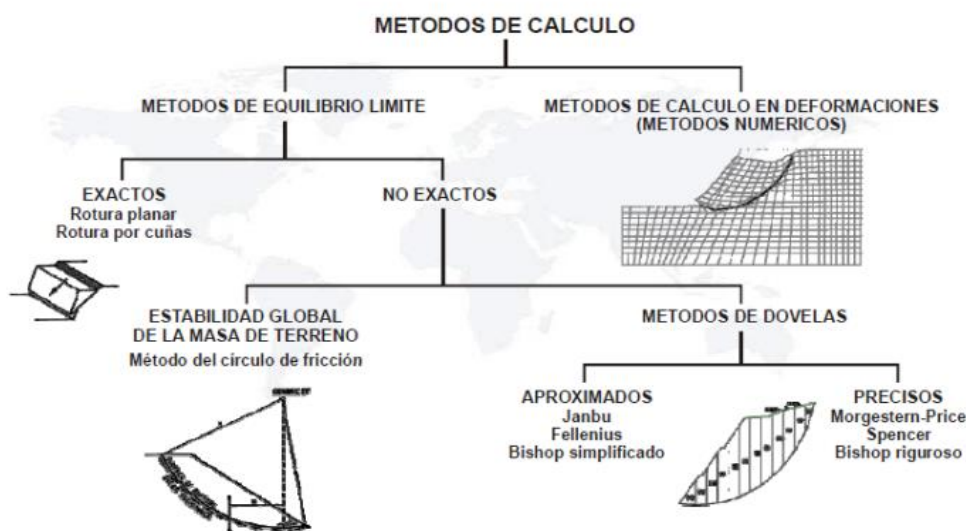
### **Gestión ambiental y cumplimiento normativo**

El análisis de estabilidad de taludes en minería también debe cumplir con regulaciones ambientales estrictas para minimizar el impacto en el entorno circundante, incluyendo la gestión adecuada de relaves y aguas residuales.

En resumen, el análisis de estabilidad de taludes en minería es multidisciplinario y requiere un enfoque integrado que considere las condiciones geológicas, las actividades mineras, la instrumentación adecuada y los modelos numéricos avanzados para garantizar la seguridad operativa y ambiental en las operaciones mineras.

**Figura N°09**

*Clasificación general de los métodos de cálculo de estabilidad*



*Fuente: CAMIPER*

Como se puede apreciar en la figura N°8 los métodos de cálculo se dividen en métodos de equilibrio límite y métodos de cálculo en deformaciones (métodos numéricos).

**Método de deformaciones**

- Consideran el cálculo de las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática.
- Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema se resuelve aplicando métodos numéricos, en elementos finitos o diferencias finitas.

- Estos métodos calculan las tensiones y deformaciones del terreno, haciendo una discretización del talud con elementos de formas variadas, siendo las más sencillas, las triangulares.
- Cada elemento, a efectos de deformaciones se caracteriza por su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

### **Hipótesis de equilibrio límite**

En el contexto de la minería, los métodos de equilibrio límite, como el método de Fellenius y sus variantes, se utilizan para evaluar la estabilidad de taludes y estructuras geotécnicas. Aquí se presentan algunas hipótesis y consideraciones clave asociadas con estos métodos:

#### **1. Material Homogéneo e Isotrópico**

- Se asume que el material del talud es homogéneo y isotrópico, lo cual significa que las propiedades del suelo (como resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción interna) son uniformes y no varían con la dirección.
- En la realidad minera, esto puede no ser completamente cierto debido a la presencia de diferentes capas de roca, suelos alterados, relaves o materiales excavados que pueden tener propiedades geotécnicas variables.

#### **2. Superficies de falla potenciales**

- Se hipotetiza la existencia de superficies de falla potenciales dentro del talud, donde podría ocurrir un deslizamiento bajo ciertas condiciones de carga y geometría.
- Estas superficies de falla son críticas para determinar la configuración del talud y calcular el factor de seguridad.

#### **3. Condición de carga**

- Se consideran las condiciones estáticas de carga, es decir, las fuerzas que actúan sobre el talud debido al peso propio del suelo, presiones de agua, cargas de estructuras adyacentes, y otras cargas externas.
- En minería, las condiciones de carga pueden variar significativamente debido a la extracción de mineral, excavaciones, voladuras y movimientos de equipo pesado, lo que puede afectar la estabilidad del talud de manera dinámica.

#### 4. Factores de seguridad

- Se calcula el factor de seguridad como la relación entre las resistencias al corte disponibles y las fuerzas impulsoras que tienden a desestabilizar el talud.
- Un factor de seguridad mayor a 1 indica que el talud es estable bajo las condiciones de carga consideradas en el análisis.
- En minería, es crucial considerar no solo el factor de seguridad actual, sino también cómo puede variar a lo largo del tiempo debido a las actividades mineras y las condiciones climáticas cambiantes.

#### 5. Simplificaciones y limitaciones

- Los métodos de equilibrio límite simplifican algunas complejidades del comportamiento real del suelo y las estructuras geotécnicas.
- Pueden no capturar completamente efectos dinámicos, como los movimientos a largo plazo, la consolidación del suelo, la interacción suelo-estructura, y la influencia de fenómenos sísmicos o climáticos extremos.

En conclusión, los métodos de equilibrio límite son herramientas poderosas para evaluar la estabilidad de taludes en minería, pero es fundamental aplicarlos con un entendimiento crítico de las hipótesis subyacentes y las limitaciones asociadas. El análisis geotécnico en minería debe complementarse con monitoreo continuo, modelamiento numérico avanzado

cuando sea necesario, y consideraciones específicas del entorno minero para asegurar la seguridad y la eficiencia operativa.

Los métodos de equilibrio límite tienen las siguientes características comunes:

Usan la misma definición para el factor de seguridad local FS

$$FS_{\text{local}} = S / T$$

Donde s representa la resistencia al corte y T el esfuerzo cortante actuante. En gran parte de los problemas de ingeniería geotécnica las mayores incertidumbres están relacionadas con la evaluación de la resistencia al corte del suelo. Así, la definición del factor de seguridad en términos de la resistencia al corte S asocia FS directamente con el parámetro cuyo grado de incertidumbre es más significativo. Además, consideran que este factor de seguridad es el mismo en todos los puntos de la superficie potencial de falla, aunque no haya razones para aceptar esta hipótesis como verdadera, excepto en la falla donde  $FS_{\text{local}} = 1.0$ .

- a) Consideran como hipótesis genérica que los macizos de suelo se comportan mecánicamente como materiales rígidos – perfectamente plásticos, sin tomar en cuenta cualquier consideración sobre los campos de esfuerzos y deformaciones generados por las cargas externas. En ciertas situaciones, esta hipótesis no es estrictamente aplicable, como en el caso de taludes en arcillas rígidas fisuradas donde la resistencia residual puede ser significativamente menor que la resistencia pico. En la práctica, esta dificultad puede ser superada usándose valores de resistencia al corte inferior a los evaluados en el pico.
- b) Usan algunas o todas las ecuaciones de equilibrio para calcular valores medios del esfuerzo cortante movilizado T y del esfuerzo normal  $\delta$  a lo largo de la superficie potencial de falla, necesarios para la estimativa de la resistencia al corte por el criterio de MohrCoulomb.

$$S = C + \delta \tan \varphi$$

- c) Introducen hipótesis para complementar las ecuaciones de equilibrio puesto que el número de incógnitas del problema es en general superior al número de ecuaciones proporcionadas por la estática.

Los métodos de análisis para ser aplicables a problemas prácticos deben ser versátiles para incluir situaciones donde las propiedades del material y valores de presión de poros varíen en el interior del macizo. Por esta razón la mayoría de los métodos de equilibrio límite subdividen la región delimitada por la superficie potencial de falla en un número cualquiera de dovelas verticales, analizándose las condiciones de equilibrio de las fuerzas actuantes en cada dovela en forma separada.

### **Conceptos básicos sobre los depósitos de relaves**

#### **¿Qué es el relave minero?**

Un relave minero es el material residual que queda después de extraer los minerales valiosos de la roca en la minería. Este material generalmente está compuesto por rocas trituradas, lodo y sustancias químicas utilizadas en el proceso de separación de minerales. Los relaves se depositan en áreas específicas llamadas depósitos de relaves o presas de relaves.

Los relaves mineros pueden contener metales residuales, minerales no deseados, y a veces sustancias tóxicas o contaminantes, lo que los convierte en un tema importante de gestión ambiental en la industria minera.

#### **Ciclo de vida de un depósito de relaves**

Los relaves en las plantas concentradoras de minería son el resultado del proceso de extracción y separación de minerales desde la roca original.

1. **Extracción del mineral:** En primer lugar, se extrae el mineral de la mina en forma de rocas grandes que contienen diversos minerales.

2. **Trituración y molienda:** Las rocas se transportan a la planta concentradora, donde son trituradas y molidas para reducir su tamaño a partículas más pequeñas. Este proceso facilita la liberación de los minerales valiosos que están incrustados en la roca matriz.
3. **Proceso de flotación:** En la mayoría de los casos, se utiliza el método de flotación para separar los minerales valiosos (como cobre, zinc, plomo, oro, plata, entre otros) de la ganga (material de desecho). Este proceso implica la adición de sustancias químicas que modifican las propiedades de la superficie de las partículas de mineral, permitiendo su separación selectiva mediante burbujas de aire.
4. **Generación de relaves:** Después de la flotación, los minerales valiosos se concentran en un producto llamado concentrado, mientras que la ganga y otras impurezas forman una suspensión acuosa llamada relave. Esta suspensión contiene agua residual y pequeñas partículas de minerales no recuperados.
5. **Depósito de relaves:** Los relaves se transportan mediante tuberías hasta un depósito de relaves, también conocido como presa de relaves o represa de relaves. Aquí, los relaves se acumulan y se separa el agua residual, que a menudo se recicla en el proceso minero para minimizar el consumo de agua.

Es importante destacar que los relaves pueden contener una variedad de componentes, incluidos metales residuales, minerales no deseados, y a veces sustancias tóxicas o contaminantes, dependiendo del tipo de mineral y de las técnicas utilizadas en la planta concentradora. Por lo tanto, la gestión adecuada de los relaves es esencial para prevenir impactos ambientales negativos, como la contaminación del agua y del suelo.

### **Opciones para la descarga de los relaves**

En la minería, existen varias opciones para la descarga y gestión de los relaves, dependiendo de factores como la ubicación geográfica, las características del terreno, el tipo de mineral procesado y las normativas ambientales. Algunas de las opciones más comunes son:

1. **Presa de relaves convencional:** Esta es la opción más utilizada, donde los relaves se descargan en una estructura construida específicamente para contener los desechos. Generalmente, esta presa está ubicada en un valle o una cuenca, y está diseñada con barreras impermeables para evitar la filtración de agua contaminada hacia el entorno. Los relaves se van acumulando gradualmente y se compactan para minimizar la cantidad de agua que contienen.
2. **Presa de relaves elevada (dry stack):** Esta opción implica el apilamiento de los relaves secos en lugar de formar una suspensión con agua. Los relaves se espesan y se deshidratan antes de ser apilados en capas sobre una superficie impermeabilizada. Este método reduce significativamente el riesgo de contaminación del agua y elimina la necesidad de construir una presa convencional de grandes dimensiones. Es una opción más costosa inicialmente, pero puede ofrecer beneficios ambientales a largo plazo.
3. **Depósito subterráneo:** En algunos casos, especialmente cuando la topografía no es adecuada para presas convencionales o cuando se busca minimizar el impacto ambiental visible, los relaves se pueden bombear hacia cavidades subterráneas abandonadas, como minas agotadas. Esto requiere un diseño cuidadoso para evitar la contaminación del agua subterránea y otros riesgos geotécnicos.
4. **Inyección en el fondo marino:** Esta opción se utiliza en ciertos lugares donde se permiten prácticas controladas de disposición submarina de relaves. Los relaves se bombean a aguas profundas bajo estrictos controles ambientales para minimizar los

impactos en el ecosistema marino. Sin embargo, esta práctica es altamente regulada y controvertida debido a posibles riesgos ambientales.

5. **Reprocesamiento de relaves:** En lugar de almacenar los relaves, se puede considerar su reprocesamiento para recuperar minerales adicionales. Este enfoque no solo reduce la cantidad de relaves almacenados, sino que también puede generar ingresos adicionales al recuperar metales valiosos que no fueron extraídos durante el procesamiento inicial.

Cada opción tiene sus ventajas y desventajas en términos de costos, complejidad técnica, impacto ambiental y cumplimiento normativo. La elección de la opción adecuada dependerá de múltiples factores y generalmente se realiza en consulta con expertos en ingeniería de relaves y gestión ambiental.

### **Principales métodos de recrecimiento de los depósitos de relaves**

El recrecimiento de los depósitos de relaves es una práctica común en la industria minera cuando el espacio disponible para almacenar relaves se agota. Este proceso implica la expansión de la capacidad de almacenamiento de la presa de relaves existente o la construcción de nuevas instalaciones para contener los relaves adicionales. Los principales métodos de recrecimiento de depósitos de relaves incluyen:

1. **Recrecimiento por elevación (Upstream):**

**Descripción:** Este método implica la construcción de capas adicionales de relaves en la parte aguas arriba de la presa existente.

**Proceso:** Se agregan nuevas capas de relaves sobre las capas ya depositadas. Cada capa nueva actúa como un muro más alto que retiene los relaves adicionales.

**Consideraciones:** Requiere un diseño cuidadoso para asegurar la estabilidad de la presa durante y después del proceso de recrecimiento. Es importante

monitorear y controlar la filtración de agua a través de las capas de relaves para prevenir la contaminación.

## 2. Recrecimiento por cresta (Centerline):

**Descripción:** En este método, se extiende la cresta de la presa de relaves hacia arriba para aumentar su altura y capacidad.

**Proceso:** Se construyen muros o estructuras adicionales en la parte superior de la cresta existente de la presa de relaves.

**Consideraciones:** Similar al método de elevación, requiere un diseño cuidadoso para garantizar la estabilidad y la impermeabilidad de la estructura. Se deben implementar sistemas de drenaje y monitoreo para gestionar cualquier riesgo potencial.

## 3. Recrecimiento por espesamiento (Downstream):

**Descripción:** Este método consiste en aumentar la altura de la presa de relaves mediante el espesamiento de los relaves depositados aguas abajo de la estructura existente.

**Proceso:** Los relaves adicionales se depositan aguas abajo de la presa existente, aumentando gradualmente la altura y capacidad de almacenamiento de la estructura.

**Consideraciones:** Es crucial controlar la sedimentación y la consolidación de los relaves para asegurar la estabilidad de la presa. Se deben considerar técnicas de gestión de agua para manejar la filtración y el exceso de agua en la estructura.

## 4. Recrecimiento lateral (Lateral Expansion):

**Descripción:** En este método, se expande la superficie lateral de la presa de relaves para aumentar su capacidad de almacenamiento.

**Proceso:** Se construyen muros o terrazas laterales adicionales para contener los relaves adicionales.

**Consideraciones:** Requiere un espacio adecuado y terreno favorable para la expansión lateral. Se debe tener en cuenta la estabilidad geotécnica y la impermeabilización de las nuevas estructuras.

Cada método de recrecimiento tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de costos, complejidad de construcción, impacto ambiental y cumplimiento normativo. La elección del método adecuado dependerá de factores como la topografía del sitio, la capacidad de la presa existente, las condiciones geotécnicas y las regulaciones ambientales locales. Es crucial realizar un análisis detallado y consultar con expertos en ingeniería de relaves y gestión ambiental para asegurar que el recrecimiento se realice de manera segura y eficiente.

### **Monitoreo de depósitos de relaves**

Los depósitos de relaves en minería pueden llegar a constituir una fuente de contaminación para elementos como los suelos, las aguas superficiales y subterráneas, y el aire. El monitoreo del depósito de relaves es fundamental para garantizar su estabilidad, seguridad y cumplimiento ambiental.

#### **1. Instrumentación geotécnica y estructural:**

Se utilizan instrumentos como piezómetros para medir la presión de agua dentro del depósito, inclinómetros para monitorear cambios en la estabilidad de taludes, extensómetros para medir movimientos de suelo, y medidores de presión para evaluar la presión sobre estructuras de contención.

#### **2. Monitoreo de filtraciones y calidad del agua:**

Se instalan pozos de monitoreo para evaluar la calidad del agua que se filtra desde el depósito de relaves. Se mide parámetros como pH, metales pesados, y otros

contaminantes para asegurar que no haya impactos negativos en cuerpos de agua cercanos.

**3. Monitoreo topográfico y geodésico:**

Se realizan levantamientos topográficos periódicos para detectar cambios en la forma del depósito y evaluar movimientos potenciales de tierra. Esto ayuda a prevenir colapsos y deslizamientos.

**4. Monitoreo sísmico:**

En áreas sísmicamente activas, se emplean redes de sismómetros para detectar movimientos sísmicos que puedan afectar la estabilidad del depósito de relaves.

**5. Monitoreo de condiciones climáticas:**

Se registra información meteorológica, como precipitación y temperatura, para evaluar su impacto en la hidrología del depósito de relaves y la estabilidad de las estructuras.

**6. Monitoreo de sedimentos y consolidación:**

Se realizan análisis para medir la sedimentación y consolidación de los relaves dentro del depósito. Esto es crucial para gestionar la capacidad de almacenamiento y prevenir riesgos de sobrecarga.

**7. Monitoreo ambiental:**

Se realizan evaluaciones periódicas del entorno circundante para detectar posibles impactos ambientales, como cambios en la calidad del agua, la vegetación o la fauna.

**8. Modelamiento y análisis de riesgos:**

Se utilizan modelos computacionales para simular diferentes escenarios de falla o degradación del depósito de relaves. Esto ayuda a prever y mitigar posibles riesgos antes de que ocurran eventos adversos.

El monitoreo del depósito de relaves debe ser continuo y sistemático, con protocolos claros y regulares de recolección, análisis y reporte de datos. La información obtenida a través del monitoreo es crucial para la toma de decisiones informadas sobre mantenimiento, gestión y, en casos extremos, evacuación o mitigación de riesgos.

### CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

#### Proceso de ingreso a la empresa

Los inicios de la formación profesional de Aaronm Mallqui se generaron en COINGEC SAC desde el 3er año de la carrera, realizando diversas actividades dentro de la empresa pasando por varias áreas. Al 4to año de la carrera, Pamela Sanchez se une a la empresa por recomendación y ambos desempeñamos labores dentro del área técnica en oficina, tales como revisión de información para realizar ingeniería básica en mecánica de suelos, apoyo elaboración de estudios de mecánica de suelos y estudios geotécnicos con fines de cimentación. Dando un paso más para nuestra formación profesional nos dieron la oportunidad de ser asistentes de supervisores de campo que realizaban trabajos para los clientes de COINGEC el cual nos ayudó mucho para actualmente tener conocimientos en logueo de calicatas y ensayos realizados in situ como densidad por el método de cono de arena y método de remplazo de agua, granulometría en campo y ensayos DPL; perforaciones geotécnicas con HQ y HQ3 triple tubo, realización de ensayos SPT, LPT y cono Peck, recuperación de muestra con tubo shelby, ensayos de permeabilidad lefranc y lugeon; perforación diamantina para instalación de piezómetros e inclinómetros; ensayos geofísicos MASW2D y 3D y tomografía eléctrica.

Todo ello fue de gran importancia para que nos den el puesto de supervisores de campo en este trabajo y tomando el mando de todas las etapas de este proyecto, desde la revisión de información, planteamiento de investigaciones geotécnicas, supervisión de la ejecución de dichas investigaciones y proceso final del análisis de estabilidad física.

Dentro de este proyecto que se llevó a cabo satisfactoriamente, fueron de mucha ayuda profesionales especializados:

- Leonardo Salas Cachay – Ing. Civil – Gerente General
- Erick Huayas Salvatierra – Ing. Geólogo-geotécnico

- Rosendo Ballarta Rivera – Ing. Geólogo
- Miguel Justiniano Buiza – Ing. Geotécnico
- Erick Bustinza Jacinto – Ing. Geofísico
- Kenner Rojas Mory – Arquitecto
- Martín Huaman Lora – Supervisor de operaciones
- Sharon Arriaran García – Coordinadora de proyectos

### **Desarrollo del proyecto**

El proyecto tiene como finalidad garantizar la estabilidad física en el corto y largo plazo de modo que se lleve a cabo el cierre final de la relavera ya que la Unidad Minera Pucarrajo dejó de operar en el año 2008 y años después exactamente en el año 2019 reanudaron actividades para realizar el proceso de cierre de sus componentes mineros, en el cual está incluido el depósito de relaves – Relaveras Antiguas.

Para prevenir un posible colapso del depósito y derrame de los materiales que contiene y producir un problema socioambiental mayor, debido a que el relave podría recorrer una distancia y llegar a la zona baja de la quebrada Sopas, en la hondonada de las pozas de tratamiento de agua además de generar pérdidas de áreas de trabajo y rutas de transporte de uso frecuente. Es por ello que se ha previsto este proyecto de Ingeniería de Estabilización Física – Relaveras Antiguas para la Unidad Minera Pucarrajo.

### **Información general del sitio**

#### **Ubicación**

La zona de estudio se encuentra ubicada en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash a 400 km al NE de Lima y una altitud promedio de 4,500 msnm. Actualmente, el depósito de relaves – Relaveras Antiguas, se encuentra inoperativo y ocupa una extensión de 8,000 m<sup>2</sup> aproximadamente y pertenece al cuadrángulo geológico de Recuay 20-i según el Boletín A 76 del Ingemmet (1996).

**Tabla N°02**

*Coordenadas de ubicación del área de estudio.*

UNIDAD MINERA PUCARRAJO			
LUGAR	COORDENADAS UTM		
	NORTE	ESTE	ALTITUD
RELAVERAS ANTIGUAS	8'915,200	271,400	4,500 msnm

El acceso a la zona desde Lima es a través de la Carretera Panamericana Norte, siguiendo la ruta Lima – Paramonga – Conococha – Pucarrajo, recorriendo una longitud total de 427.9 km aproximadamente (418.9 km de carretera asfaltada y los últimos 9 km de carretera afirmada).

- Lima – Conococha, 329.2 km asfaltada.
- Conococha – Yanashallash, 83.7 km asfaltada.
- Yanashallash – Desvio, 8.0 km asfaltada.
- Desvio – Pucarrajo, 9.0 km afirmada

**Figura N°10**

*Vista en planta de la ubicación de las Relaveras Antiguas*



*Fuente: Vista satelital de Relaveras Antiguas (Google Earth, 2022)*

## **Geología regional**

Geográficamente, la unidad minera Pucarrajo se ubica en la Cordillera Blanca, la cual forma parte de la cordillera occidental del Perú, ubicada según las coordenadas UTM WGS 84 en un punto representativo de 271 000 E, 8 915 000 N, a una altura comprendida entre 4000 y 4800 msnm. Geológicamente está ubicada en una cuenca sedimentaria plegada en anticlinales y sinclinales un tanto simétricos de orientación NO-SE, con formaciones que afloran en la región pertenecientes al Cretáceo inferior y superior. Regionalmente, todas las estructuras se encuentran emplazadas en secuencias de rocas sedimentarias, la cual da inicio con las formaciones del grupo Goyllarisquizga, compuestas por areniscas y limoarcillitas, seguidas por calizas macizas de las formaciones Pariahuanca y Pariatambo de edad Cretáceo inferior, sobreyaciendo concordantemente se encuentran las formaciones Jumasha y Celendín compuestas por calizas grises y calizas margosas nodulares, pertenecientes al Cretáceo superior. Coronando la secuencia sedimentaria, se presentan las rocas volcánicas del Grupo Calipuy compuestas por piroclastos y aglomerados andesíticos - dacíticos. Las rocas plutónicas presentes en el área del proyecto están representadas por cuerpos intrusivos de composición granodiorítica, denominados stock Ishpag. Este contacto del intrusivo con los estratos sedimentarios produjo el metamorfismo hidrotermal de Pucarrajo, responsable de la mineralización y el desarrollo de rocas metamórficas. El intrusivo se emplazó a través de las fallas regionales Huari, Jirca y San Marcos.

## **Geología local**

La geología en Pucarrajo, se caracteriza por presentar una secuencia sedimentaria en las cuales litológicamente resaltan la presencia de estratificaciones calcáreas bien definidas y afloramientos de arenisca.

## **Geomorfología**

El área estudiada está ubicada en la unidad geomorfológica de la Cordillera Occidental de los Andes, que se encuentra dividida por valles glaciales y fluviales las cuales fueron modeladas en rocas sedimentarias del cretáceo.

La presa de relaves – Relaveras Antiguas esta dispersa en la parte superior de la quebrada Pucarrajo con una altura aproximada de 4,480 msnm. La quebrada se identifica como un pequeño valle glacial, donde fluyen aguas de escorrentía y su fondo presenta una forma tipo “U”, perteneciente de la acción glaciaria. No obstante, la morfología de sus laderas es asimétrica, en el sentido NE se visualizan laderas de altas pendiente ( $50^{\circ}$  -  $80^{\circ}$ ) con presencia de enormes y escarpadas montañas de rocas carbonatadas, y hacia el sentido SO presentan laderas entre  $20^{\circ}$  -  $40^{\circ}$ .

### **Geología estructural**

La principal característica estructural lo constituye la cuenca sedimentaria plegada, formada por anticlinales y sinclinales, cuyos ejes presentan orientaciones alineadas a estructuras andinas NO-SE, como el anticlinal Tancan, como consecuencia de esfuerzos compresivos, ocurridos durante fines del Cretáceo y comienzos del terciario donde se ubica la unidad minera Pucarrajo. Regionalmente existen algunas fallas importantes con rumbo NO-SE son inversas, como las fallas Santa María e Ichic Chacra, cabe resaltar que no se ha encontrado evidencia de actividad sísmica de estas fallas. También existen fallas con rumbos dextral y sinistral, con direcciones generalmente NO-SE.

En cuanto a la edad del sobre escurrimiento, se puede anotar que parte de la deformación ocurrió antes del metamorfismo de contacto producido por el batolito de la Cordillera Blanca y su apófisis.

## Estratigrafía

Las unidades estratigráficas presentes en la zona de estudio las constituyen las formaciones geológicas del Cretácico inferior, desde la más antigua hasta la más reciente (Chimú Ki-chi, Santa Ki-sa y Carhuaz Ki-ca), estas secuencias sedimentarias fueron intruídas por el Stock Ishpag de composición granodiorítica-diorítica. Sobreyaciendo se tienen unidades del cuaternario reciente como depósitos morrénicos, coluviales y aluviales, además se tiene presencia de suelos hidromórficos. A continuación, se detallan las características principales de las formaciones nombradas anteriormente:

- **Formación Chimú:** Las areniscas cuarzosas caracterizan a esta formación, en algunas zonas se han observado que constituyen núcleos de anticlinales con rumbo NO-SE. Su contacto es concordante con la formación Oyón (Chicama) e infrayace a la formación Santa en contacto similar al anterior. La formación Chimú consiste principalmente de estratos de areniscas cuarzosas blancas y macizas en capas de 1 a 3 m de espesor, en total la secuencia completa puede variar entre 100 a 600 m de espesor, destaca por su morfología conspicua y capas de areniscas resistentes a la erosión.
- **Formación Santa:** Yace concordante sobre la formación Chimú, consiste de calizas color azul grisáceo con meteorización característica de corteza azulina. Sus estratos tienen grosores de 0,10 a 1,0 m; puede presentar concreciones de chert. Los afloramientos se encuentran fracturados y plegados, en algunos casos se encuentran asociados a plegamientos recumbentes.
- **Formación Carhuaz:** Sus afloramientos más notorios se encuentran al este de la Cordillera Blanca donde ocurren formando el núcleo de sinclinales kilométricos. La morfología que caracteriza a la formación Carhuaz es más suave en relación con las unidades adyacentes. Consiste principalmente de areniscas con limoarcillitas de

color gris a gris-verde, aunque pueden estar presentes capas de arenisca cuarcífera en la parte central de la formación. Las chimeneas CH-1 y los tajos Don José 00, Don José 01, Don José 02, Don José 04, Don José 05, Don José TJ-10, Don José TJ-10B, Don José TJ-10C y Don José TJ-10D, fueron identificadas en esta formación.

- Formación Pariahuanca: Consiste típicamente de calizas macizas de cierto color gris azulado en estratos de 1 a 2 m de grosor. Algunas veces presenta una ligera apariencia lajosa y cuando sucede superficialmente puede asemejarse a las calizas de la formación Santa. Las chimeneas CH-6, CH-13, CH-3A, CH-N4A, CH-5A, CH-5B y los tajos TJ-2, TJ-3, TJ-4, TJ-5; TJ-7, TJ-11, TJ-11B, TJ-12, TJ-12A, TJ-12B y TJ-13, fueron identificadas en esta formación.

### **Geodinámica y peligro geológico**

Dentro de la zona de influencia no se han identificado riesgos geodinámicos de gran magnitud. Estos procesos geodinámicos están relacionados principalmente a los fenómenos de meteorización provocados por lluvias, falta de cobertura orgánica, vientos y cambios climáticos, mayormente en taludes pronunciados evidenciados por surcos de erosión y bloques de roca desplazados. Entre los principales riesgos geológicos se presentan los riesgos de origen antrópico que están asociados a cortes de afloramientos rocosos en la construcción de accesos y plataformas, los cuales se encuentran en proceso de estabilización natural; y los flujos de detritus leves, en periodos extraordinarios de precipitación.

### **Sismicidad**

Dentro del territorio peruano se han establecido diversas zonas sísmicas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo con la mayor o menor presencia de sismos. Esta sismicidad es producto principalmente de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Continental a lo largo de la costa peruana. Según el Mapa de zonificación sísmica propuesto en la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 del Reglamento Nacional de

Edificaciones, el área de estudio se encuentra comprendido en la Zona 3, correspondiente a una sismicidad alta. Tomando en cuenta la neotectónica y sismotectónica de la zona de estudio, la actividad sísmica ejerce una influencia significativa sobre el área del proyecto. Los sismos que más contribuyen a la aceleración máxima (PGA) en la U. M. Pucarrajo son eventos que ocurren en la zona de subducción de intraplaca de la placa de Nazca con Mw 7.0 a Mw 7.8 alrededor de 90 a 110 km del área de interés.

SRK Consulting (2019), en base a la estimación probabilística, considerando un periodo de retorno de 475 años, para la U. M. Pucarrajo, estimó un valor de PGA para un suelo de tipo B de 0.323 g. Este estudio ha considerado también la evaluación de niveles de aceleraciones para otros periodos de retorno y aceleraciones espectrales. Por ejemplo; el valor del PGA para 50 años de periodo de retorno es de 0.1375 g, el valor del PGA para 150 años de periodo de retorno es de 0.194 g, el valor del PGA para 500 años de periodo de retorno es de 0.327 g, el valor del PGA para 1,000 años de periodo de retorno es de 0.408 g y el valor del PGA para 2,475 años de periodo de retorno es de 0.541 g.

Según el estudio de peligro sísmico realizado en el área de la zona del proyecto por SRK Consulting en el año 2019. Los resultados de aceleración máxima del terreno ( $PGA=0.194g$ ) para un período de retorno de 150 años y una condición temporal de cierre (operación) de estabilización del depósito, la aceleración máxima horizontal correspondiente para realizar el análisis con sismo es  $a_h=0.097$ , que equivale al 50 % de PGA para el período de retorno asignado. Se considera que la aceleración, es suficientemente conservadora para asegurar la estabilidad de los depósitos de desmonte y permitir reparaciones a estos, en el caso de que se presente un sismo mayor al de diseño. Para condiciones de cierre se deberá actualizar y evaluar este valor de aceleración máxima, asumido en el presente informe.

### Coeficiente sísmico

Según la norma técnica E.030 y según la zona en donde se ubica la instalación, el PGA es 0.35. De acuerdo con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, Hynes y Franklin, 1984), se sugiere el uso de un coeficiente sísmico pseudoestático igual al 50 % de la aceleración pico de diseño (PGA). En consecuencia, para el diseño de los taludes por métodos pseudoestáticos en el presente estudio, se considera un coeficiente sísmico igual a 1/2 de la aceleración horizontal máxima de diseño (PGA).

### Tabla N°03

*Resumen de coeficiente sísmico*

Descripción	Área	Tr Años	Coeficiente Sísmico
Condición de operación	Relaveras antiguas	150	0.097
Condición de operación	Relaveras antiguas	500	0.164
Condición de operación	Relaveras antiguas	1000	0.204
Condición de operación	Relaveras antiguas	2475	0.271

*Nota: Esta tabla muestra el resumen de coeficiente sísmico según su periodo de retorno*

### Hidrología

La información pluviométrica del área del proyecto, disponible en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), es muy escasa. Para poder analizar los caudales extremos en la microcuenca del Proyecto se utilizaron los registros de precipitación máxima diaria de la estación Milpo, la más cercana al área del estudio y la que mejor representa las condiciones pluviométricas de la zona.

Para efectos de este análisis se ha optado por definir las áreas de influencia de la escorrentía superficial que afectan a los depósitos. Se efectuó la evaluación hidrológica para determinar la precipitación máxima que sirva como base para calcular el caudal de diseño con periodo

de retorno de 200 años. Los resultados de esta evaluación permitirán definir y dimensionar las estructuras hidráulicas previstas en el presente informe.

### **Estimación de la precipitación extrema**

Este capítulo está basado en la información proporcionada por Nyrstar e información recopilada por SRK disponible en el SENAMHI, relevante para la elaboración del presente estudio.

### **Información pluviométrica**

Para la caracterización climatológica utilizó la estación Milpo, operada por el SENAMHI, ubicada en el distrito de Catac, a 4,400 msnm. La estación se localiza aproximadamente a 20 km al suroeste del área de las microcuencas evaluadas.

### **Tabla N°04**

*Estación pluviométrica de la zona de estudio*

<b>Estación</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Latitud (Este)</b>	<b>Longitud (Norte)</b>	<b>Periodo de registro (años)</b>	<b>Tipo de registro</b>
Milpo	4,400	9°53'	76°49'	1981-1988 y 1990-2014	Precipitación máx en 24 h

*Nota: Esta tabla indica la ubicación y el periodo de registro de la estación pluviométrica que tiene influencia directa en la zona de estudio*

### **Precipitación máxima en 24 horas**

Para el análisis se emplearon los registros de precipitaciones extremas diarias de la estación Milpo, que cubre los periodos de registro desde 1981 a 1988 y desde 1990 a 2014 (33 años) y se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla N°05**

*Registro de precipitación máxima diaria*

<b>Año</b>	<b>P<sub>máx</sub> 24 (mm)</b>	<b>Año</b>	<b>P<sub>máx</sub> 24 (mm)</b>	<b>Año</b>	<b>P<sub>máx</sub> 24 (mm)</b>
1981	19.2	1993	33.5	2004	29.5
1982	50.2	1994	31.6	2005	28.2
1983	13.0	1995	28.2	2006	43.2
1984	16.6	1996	33.2	2007	39.4
1985	24.7	1997	25.4	2008	53.8
1986	11.5	1998	44.8	2009	37.2
1987	18.1	1999	40.8	2010	52.7
1988	21.6	2000	41.0	2011	40.4
1990	12.1	2001	28.4	2012	51.6
1991	26.8	2002	55.6	2013	45.7
1992	16.8	2003	24.6	2014	63.1

*Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI*

### **Análisis de precipitación extrema**

Los eventos de precipitación extrema para diferentes periodos de retorno han sido calculados en base a la precipitación máxima diaria. En la Tabla N°06 se muestran las precipitaciones extremas para diferentes periodos de retorno

**Tabla N°06**

*Precipitación extrema para diferentes periodos de retorno*

<b>T (años)</b>	<b>P<sub>máx</sub> corregida (mm)</b>	<b>T (años)</b>	<b>P<sub>máx</sub> corregida (mm)</b>
2	37.1	100	77.3
5	50.8	200	82.0
10	58.3	300	84.7
20	64.7	500	87.9
25	66.6	1,000	92.1
50	72.2	10,000	105.0

*Fuente: SRK consulting (2018)*

Estos datos de precipitación máxima de 24 horas son representativos para la zona de estudio y fueron corregidos por un factor de 1.13, según lo recomendado por L. L. Weiss para registros de precipitaciones máximas anuales tomadas en un intervalo de observación único y fijo, para cualquier duración comprendida entre 1 y 24 horas. La corrección convierte la precipitación representativa en precipitación máxima en 24 horas para un determinado periodo de retorno

### **Análisis de avenida o tormenta de diseño**

Las aguas de escorrentía superficial sobre y alrededor de los depósitos de desmontes se captarán y derivarán a través de los canales de coronación, derivación y de pie proyectados, y otras estructuras hidráulicas complementarias necesarias para el manejo de estos flujos de agua. Todas las estructuras deberán cumplir con la capacidad hidráulica suficiente como para conducir el caudal generado por una precipitación extrema correspondiente a un periodo de retorno definido.

La determinación del periodo de retorno a ser utilizado en el dimensionamiento de los canales se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones de la Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina, publicado por el Ministerio de Energía y Minas (MEM, agosto de 1997), y el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

Ambas entidades recomiendan que para la selección del periodo de retorno se debe considerar la relación existente entre la probabilidad de excedencia de un evento, la vida útil de la estructura y el riesgo de falla que se desea asumir en el caso de que la obra llegase a fallar dentro de su tiempo de vida útil.

En la siguiente tabla se presentan los valores de periodo de retorno (T) para diferentes valores de riesgo (R) y la vida útil de la obra (n).

**Tabla N°07**

*Valores de periodo de retorno (T) en años*

Riesgo admisible (R)	Vida útil de las obras en años (n)										
	1	2	3	5	10	20	25	50	100	200	
0,01	100	199	299	498	995	1990	2488	4975	9950	19900	<b>Periodo de retorno (T)</b>
0,02	50	99	149	248	495	990	1238	2475	4950	9900	
0,05	20	39	59	98	195	390	488	975	1950	3900	
0,10	10	19	29	48	95	190	238	475	950	1899	
0,20	5	10	14	23	45	90	113	225	449	897	
0,25	4	7	11	18	35	70	87	174	348	695	
0,50	2	3	5	8	15	29	37	73	154	289	
0,75	1,3	2	2,7	4,1	7,7	15	18	37	73	144	
0,99	1	1,11	1,27	1,66	2,7	5	5,9	11	22	44	

*Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC*

Para la definición del periodo de retorno a ser utilizado, se asume conservadoramente una vida útil de 20 años y un nivel de riesgo aceptable de 10%, donde el resultado sería un periodo de retorno de 190 años.

Bajo esta consideración, la tormenta de diseño utilizada para el diseño de los canales de coronación proyectados, así como las obras hidráulicas complementarias, será la equivalente a 200 años de periodo de retorno.

### **Investigaciones geotécnicas de campo**

Para llevar a cabo los estudios geotécnicos de campo, se realizó un plan de investigaciones geotécnicas de campo complementarias que incluyo la ejecución de mapeo geológico-geotécnico, perforaciones geotécnicas, ensayos SPT, DPL y ensayos geofísicos (MASW2D y Tomografía eléctrica)

Los trabajos de campo realizados por Coingec S.A.C. se desarrollaron en el mes de noviembre del 2022, los cuales permitieron caracterizar las condiciones geotécnicas del

cuerpo y cimentación de las relaveras antiguas. Además, se tomaron muestras representativas para determinar la resistencia de los materiales en base a los resultados de los ensayos de campo y ensayos de laboratorio.

### Revisión de información

Como parte de la investigación se revisaron estudios geotécnicos de campo preliminares, tales como las desarrolladas por Coingec S.A.C. por encargo de la empresa TRANSLUMASA S.A.C en abril del 2022, estas comprenden perforaciones con fines geotécnicos ubicadas en la zona de las Relaveras Antiguas.

**Tabla N°08**

*Perforaciones geotécnicas ejecutadas – TRANSLUMASA*

Área	Perforación (Cantidad)	Coordenadas WGS84		Cota Superior (msnm)	Longitud Total (m)
		Este (m)	Norte (m)		
Relaveras Antiguas	BH-PU-01	271 121.00	8 914 918.00	4 555.00	18.70
	BH-PU-02	271 196.00	8 914 851.00	4 545.00	14.10
	BH-PU-03	271 198.00	8 914 707.00	4 554.00	11.0
	BH-PU-04	271 219.29	8 914 671.94	4 550.00	14.10
	BH-PU-05	271 236.11	8 914 685.07	4 554.00	12.85
	BH-PU-06	271 209.08	8 914 733.29	4 555.00	12.80
	BH-PU-08	271 221.32	8 914 836.37	4 538.00	13.40
	BH-PU-09	271 162.00	8 914 881.84	4 551.00	15.00
	BH-PU-10	271 154.23	8 914 912.82	4 547.00	14.90
	BH-PU-10-2	271 151.00	8 914 916.00	4 547.00	22.40

*Nota: En la tabla se detallan las perforaciones realizadas por TRANSLUMASA en abril del 2022*

### Mapeo geológico - geotécnico

Coingec S.A.C. realizó el mapeo geológico – geotécnico en la zona de estudio, el cual permitió identificar los rasgos geológicos y las unidades geológico – geotecnicas presentes. Dichas unidades también fueron determinadas con base en la revisión de información y complementadas con trabajos de campo.

#### A. Depósito Coluvial (unidad geológica – geotécnica I)

Se encuentra formado por material fragmentado, transportado y depositado en laderas por acción de la gravedad. Clasifica según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como: GP-GM, GC, GM, GC-GM, plasticidad media a alta (Índice de plasticidad.  $IP=7-17$ ), suelta a medianamente densa, húmeda a muy húmeda, color beige, grava angulosa a subangulosa con presencia de bolonería  $TM = 8''$  en 8 % del volumen total.

### **B. Depósito Morrénico (Unidad geológica – geotécnica II)**

Se origina a partir de procesos de desglaciación y gelifracción. Clasifica visualmente según SUCS como: GP-GM, plasticidad media a alta, medianamente densa a densa, húmeda a muy húmeda, color beige, grava angulosa a subangulosa con presencia de bolonería  $TM = 10''$  en 10 % del volumen total.

### **C. Basamento Rocoso (Unidad geológica – geotécnica III)**

- ***Areniscas con Limoarcillitas (Formación Carhuaz):*** Roca sedimentaria detrítica perteneciente a la formación Carhuaz. Presenta intercalaciones con limolitas, resistencia media a alta (R3-R4), moderadamente alterada, extremadamente fracturada a muy fracturada (*Rock Quality Designation*. RQD de 25 a 50 %), color gris verdoso con juntas rellenas de arcilla. Según los estándares del *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM) presenta una calidad geomecánica regular (*Rock Mass Rating*, RMR básico de 41 a 60).
- ***Calizas (Formación Santa):*** Roca sedimentaria calcárea perteneciente a la formación Santa. Presenta intercalaciones de estratos grueso y delgados, resistencia muy alta (R5), ligeramente alterada, moderadamente fracturada a fracturada (RQD de 50 a 90 %), color gris con juntas rellenas de calcita.

Según los estándares del ISRM tiene una calidad geomecánica regular a buena (RMR básico de 53 a 62).

- ***Areniscas con Limolitas (Formación Chimú):*** Roca sedimentaria detrítica perteneciente a la formación Chimú. Presenta intercalaciones con lutitas en estratos delgados, resistencia muy alta (R5), ligeramente alterada, moderadamente fracturada a fracturada (RQD de 50 a 90 %), color gris blanquecino con juntas rellenas de arcilla. Según los estándares del ISRM tiene una calidad geomecánica regular (RMR básico de 43 a 57).

### Ubicación de perforaciones diamantinas

Las perforaciones con fines geotécnicos, desarrolladas y supervisadas por Coingec en noviembre del 2022, se ubican en la zona de las Antiguas Relaveras, asimismo, se detallan las coordenadas y cota superficial.

### Tabla N°09

*Perforaciones geotécnicas ejecutadas – COINGEC noviembre 2022*

Área	Perforación (Cantidad)	Coordenadas WGS84		Cota Superior (msnm)	Longitud Total (m)
		Este (m)	Norte (m)		
Relaveras Antiguas	BH-RA-01	271217.00	8914669.00	4543.38	9.15
	BH-RA-02	271223.18	8914712.06	4545.86	9.25
	BH-RA-03	271176.86	8914727.88	4549.51	7.25
	BH-RA-04	271201.27	8914752.12	4548.01	7.00
	BH-RA-05	271214.59	8914824.76	4537.02	10.10
	BH-RA-06	271210.61	8914860.55	4538.35	11.45
	BH-RA-07	271173.87	8914850.13	4541.40	6.60
	BH-RA-08	271148.82	8914872.51	4546.72	8.10
	BH-RA-09	271166.79	8914888.96	4546.16	14.70
	BH-RA-10	271179.00	8914887.00	4537.99	11.80
	BH-RA-11	271137.00	8914890.00	4547.00	8.40
	BH-RA-12	271144.00	8914928.81	4545.49	13.40
	BH-RA-13	271102.17	8914928.81	4547.48	3.80
	BH-RA-14	271119.41	8914957.64	4545.58	12.10
	BH-RA-15	271239.00	8914681.00	4545.86	13.05

Fuente: Propia

## Ensayos de penetración estándar (SPT)

Con el objetivo de estimar la resistencia al corte de los suelos encontrados en las perforaciones geotécnicas se ejecutaron un total de 15 ensayos de penetración estándar (SPT).

El ensayo SPT se realiza ingresando un muestreador estándar de caña partida de 2” de diámetro interior a la profundidad donde se quiera realizar el ensayo, posteriormente se deja caer en caída libre una masa de 140 libras (63 kg) sobre un cabezal de impacto desde una altura de 30” (76,2 cm) hasta que el muestreador penetre 15 cm, a continuación, se toma la lectura del número de golpes necesarios para penetrar un tramo de 15 cm y los dos tramos siguientes de 15 cm.

Durante la ejecución de los ensayos se obtuvieron muestras representativas del material para propósitos de identificación y ensayos de laboratorio apropiados para muestras disturbadas. Los ensayos SPT se ejecutaron bajo la norma ASTM D1586-11. En el Anexo A.2 se presentan los registros y los golpes obtenidos del ensayo SPT. En la Tabla 3.2 se presenta el resumen de las perforaciones realizadas y en la Tabla 3.3 se muestran los resultados de los ensayos SPT.

### Tabla N°10

#### *Resumen de resultados de los ensayos de penetración estándar (SPT)*

Perforación	Ensayo	Profundidad (m)	N° golpes			N <sub>SPT</sub> (golpes/30 cm)
			15	30	45	
BH-RA-01	SPT-01	2.20	2	3	4	7
BH-RA-02	SPT-01	4.00	3	3	4	7
BH-RA-03	SPT-01	5.00	0	1	1	2
BH-RA-05	SPT-01	6.00	2	1	3	4
BH-RA-06	SPT-01	7.80	3	2	3	5
BH-RA-07	SPT-01	3.90	2	1	1	2
BH-RA-08	SPT-01	3.00	7	6	8	14
BH-RA-09	SPT-01	2.20	7	4	4	8
BH-RA-10	SPT-01	8.00	2	1	3	4

BH-RA-11	SPT-01	3.00	3	0	1	1
BH-RA-12	SPT-01	2.00	6	6	7	13
BH-RA-14	SPT-01	1.50	10	13	15	28
	SPT-02	3.00	2	2	2	4
	SPT-03	9.00	1	1	4	5
BH-RA-15	SPT-01	5.80	1	2	2	4

Fuente: Propia

### Ensayo de penetración ligera (DPL)

Con el objetivo de evaluar la resistencia de los materiales arcillosos-limosos que conforman los materiales superficiales del talud, se realizaron 13 ensayos DPL en las calicatas ejecutadas y próximas a ellas. El ensayo se realizó bajo la norma NTE 339.159 (DIN4094). El ensayo consiste en dejar caer en caída libre una masa de 10 kg sobre un cabezal de impacto desde una altura de 50 cm hasta que el muestreador penetre 10 cm. Posteriormente, se toma la lectura del número de golpes del DPL (NDPL) necesarios para penetrar tramos de 10 cm. En la siguiente tabla se presenta el resumen de los ensayos DPL realizados.

**Tabla N°11**

*Resumen de ensayos de penetración ligera (DPL)*

Área	Sondaje	Coordenada UTM*		Profundidad (m)
		Este	Norte	
Relaveras Antiguas	DPL-RA-01	271185.00	8914698.00	6.40
	DPL-RA-02	271204.00	8914671.00	1.70
	DPL-RA-03	271203.00	8914695.00	8.10
	DPL-RA-04	271231.00	8914702.00	6.30
	DPL-RA-05	271214.00	8914739.00	5.10
	DPL-RA-06	271183.00	8914742.00	1.40
	DPL-RA-07	271193.00	8914869.00	8.20
	DPL-RA-08	271214.00	8914840.00	9.30
	DPL-RA-09	271227.00	8914837.00	9.00
	DPL-RA-13	271151.00	8914897.00	8.80
	DPL-RA-14	271136.22	8914946.96	10.00
	DPL-RA-15	271104.00	8914966.00	9.10
	DPL-RA-16	271081.26	8914983.85	1.60

Fuente: Propia

## Ensayos Geofísicos

Se desarrollaron ensayos geofísicos, con el método de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW) y tomografía eléctrica, los cuales se ubicaron en el cuerpo y talud de la relavera

### Ensayos MASW 2D

Se ejecutaron 08 líneas MASW 2D con una longitud total de 600 m. El espaciamiento entre geófonos fue de 1.5 y 3 m, con líneas por ensayo de 50 m y 75 m. En los ensayos MASW 2D, se efectuaron 25 golpes por cada ensayo: 1 al inicio y 1 al final de la línea, asimismo en el espacio medio entre todos los geófonos.

En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de los ensayos MASW 2D. El sistema de coordenadas corresponde al elipsoide de referencia WGS84, zona 18S.

### Tabla N°12

#### *Ubicación de los ensayos MASW 2D*

Área	Ensayo	Longitud (m)	Coordenada inicial		Coordenada final	
			Este	Norte	Este	Norte
Relaveras Antiguas	MASW2D-01	75	271227.10	8914676.10	271180.44	8914734.40
	MASW2D-02	75	271185.98	8914659.00	271217.09	8914727.20
	MASW2D-03	75	271174.77	8914693.40	271182.02	8914768.01
	MASW2D-04	75	271191.65	8914823.90	271176.79	8914897.40
	MASW2D-05	75	271239.16	8914763.10	271180.89	8914843.90
	MASW2D-06	75	271158.12	8914856.40	271229.84	8914834.40
	MASW2D-07	75	271103.46	8914919.30	271169.12	8914883.10
	MASW2D-08	75	271160.98	8914874.50	271112.94	8914932.05

*Fuente: Propia*

### Ensayos de tomografía eléctrica

Se realizaron 8 líneas de tomografía eléctrica con una longitud total de 595 m. El espaciamiento entre electrodos fue de 3.0 m por ensayo de 75 m

En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de los ensayos de tomografía eléctrica. El sistema de coordenadas corresponde al elipsoide de referencia WGS84, zona 18S.

**Tabla N°13**

*Ubicación de los ensayos de tomografía eléctrica*

Área	Ensayo	Longitud (m)	Coordenada inicial		Coordenada final	
			Este	Norte	Este	Norte
Relaveras Antiguas	TE-01	75	271227.10	8914676.10	271180.44	8914734.40
	TE-02	75	271185.98	8914659.00	271217.09	8914727.20
	TE-03	75	271174.77	8914693.40	271182.02	8914768.01
	TE-04	75	271191.65	8914823.90	271176.79	8914897.40
	TE-05	75	271239.16	8914763.10	271180.89	8914843.90
	TE-06	75	271158.12	8914856.40	271229.84	8914834.40
	TE-07	75	271103.46	8914919.30	271169.12	8914883.10
	TE-08	75	271160.98	8914874.50	271112.94	8914932.05

*Fuente: Propia*

## Resultados de los ensayos geofísicos

### Interpretación de los ensayos MASW 2D

Los resultados de los ensayos MASW 2D ejecutados en la zona del talud, se presentan en el Anexo C, en el cual se muestra el perfil sísmico bidimensional de velocidades de ondas de corte.

Los ensayos MASW 2D han permitido explorar el subsuelo hasta una profundidad máxima de 28 m aproximadamente. A continuación, la Tabla 4.3 describe cada perfil Vs obtenido.

**Tabla N°14**

*Resumen de ensayos MASW 2D*

Línea	Estrato	Vp m/s	Vp promedio m/s	Espesor (m)	Descripción
MASW2D-01	Estrato 1	156 - 193	174	3.20 - 3.50	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	193 - 424	308	6.50 - 8.00	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido

Línea	Estrato	Vp m/s	Vp promedio m/s	Espesor (m)	Descripción
	Estrato 3	424 - 500	462	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-02	Estrato 1	175 - 201	188	3.70 - 4.20	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	201 - 350	275	7.20 - 7.60	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	350 - 450	400	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-03	Estrato 1	160 - 200	180	3.30 - 4.20	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	200 - 430	315	7.60 - 8.00	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	430 - 530	480	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-04	Estrato 1	190 - 220	205	2.40 - 4.15	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	220 - 480	350	9.20 - 7.30	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	480 - 605	542	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-05	Estrato 1	188 - 220	205	2.10 - 2.90	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	220 - 450	335	5.40 - 6.30	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	460 - 670	532	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
	Estrato 2	210 - 410	310	3.70 - 5.50	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	410 - 570	490	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-07	Estrato 1	195 - 218	206	3.20 - 4.60	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	220 - 428	324	6.90 - 8.50	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	428 - 500	465	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso
MASW2D-08	Estrato 1	190 - 210	200	3.80 - 4.80	Material posiblemente asociado a suelo medianamente denso
	Estrato 2	210 - 490	350	6.40 - 7.10	Material posiblemente asociado a suelo muy rígido
	Estrato 3	490 - 600	545	-	Material posiblemente asociado a suelo muy denso rocoso

Fuente: Propia

### Interpretación de los ensayos de tomografía eléctrica

A continuación, se describe a detalle cada perfil.

#### ***A. Perfil de tomografía eléctrica TE-01***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes:

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja (2 - 60  $\Omega$ .m) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de (60 - 180  $\Omega$ .m), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociados a suelos con saturación baja.

#### ***B. Perfil de tomografía eléctrica TE-02***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes:

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja (2- 70  $\Omega$ .m) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de (70 - 220  $\Omega$ .m), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

#### ***C. Perfil de tomografía eléctrica TE-03***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja (9- 91  $\Omega$ .m) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.

- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de (91 - 258  $\Omega$ .m), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

#### ***D. Perfil de tomografía eléctrica TE-04***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja (1.4- 57  $\Omega$ .m) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de (57 - 180  $\Omega$ .m), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

#### ***E. Perfil de tomografía eléctrica TE-05***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja (12- 81  $\Omega$ .m) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de (81 - 180  $\Omega$ .m), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

#### ***F. Perfil de tomografía eléctrica TE-06***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja ( $5 - 60 \Omega.m$ ) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de ( $60 - 220 \Omega.m$ ), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

### ***G. Perfil de tomografía eléctrica TE-07***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja ( $8 - 62 \Omega.m$ ) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de ( $62 - 187 \Omega.m$ ), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

### ***H. Perfil de tomografía eléctrica TE-08***

El perfil geoelectrico muestra 2 zonas predominantes.

- Zona 1: Corresponde a una región con valores de resistividad baja ( $2- 68 \Omega.m$ ) a nivel superficial y en profundidad, esta región estaría asociada a suelos muy saturados.
- Zona 2: La segunda zona presenta resistividades mayores de ( $68 - 220 \Omega.m$ ), ubicados por encima de la zona de baja resistividad, asociado a suelos a suelos con saturación baja.

## **Ensayos de laboratorio**

Para el desarrollo de la presente investigación se obtuvieron muestras del cuerpo y cimentación de las Relaveras Antiguas, a los cuales se realizaron ensayos estándares y especiales de laboratorio con el fin de obtener sus características físicas y mecánicas. Por ello se ejecutaron los siguientes ensayos:

- 24 ensayos de clasificación SUCS
- 02 ensayos triaxial CU
- 05 ensayos triaxial UU
- 03 ensayos de carga puntual

Los ensayos de laboratorio fueron llevados a cabo en el laboratorio geotécnico de GECAT Ingenieros SAC y Geolab SA, ambos ubicados en Lima. Los ensayos fueron realizados siguiendo los procedimientos de los métodos de ensayo de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

### **Ensayos índices de mecánica de suelos**

Para las muestras obtenidas del desarrollo de las investigaciones geotécnicas de campo se ejecutaron ensayos índices y de clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Las propiedades índices de los suelos ensayados en términos de granulometría, límite de plasticidad y contenido de humedad, se resumen en la Tabla N°14

Las normas en los cuales se rigen los ensayos son los siguientes:

- Análisis granulométrico por tamizado e hidrómetro, NTP 339.128 / ASTM D422
- Límite líquido y límite plástico, NTP 339.129 / ASTM D4318
- Contenido de humedad, NTP 339.127 / ASTM D2216

### **Tabla N°15**

*Resumen de ensayos de clasificación de suelos*

Código de Perforación	Prof. (m)	Clasif. SUCS	Granulometría			LL (%)	IP (%)	Cont. hum. (%)
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)			
BH-RA-02_SH-02	5.05	SM	0.0	57.6	42.4	NP	NP	11.33
BH-RA-05/SH-05	4.20	ML	5.4	44.0	50.7	NP	NP	14.34
BH-RA-12/SH-12	9.00	SM	0.1	61.5	38.4	NP	NP	15.42
BH-RA-01/SPT-01	2.20-2.65	ML	2.6	34.2	63.2	11.89	NP	21.72
BH-RA-02/SPT-01	4.00-4.45	SM	1.4	61.0	37.6	NP	NP	11.24
BH-RA-03/SPT-01	5.00-5.45	ML	0.0	14.6	85.4	16.54	3.80	14.62
BH-RA-5/SPT-01	6.00-6.45	SM	1.3	51.6	47.2	12.29	NP	12.97
BH-RA-06/SPT-01	7.80-8.25	CL-ML	0.0	19.3	80.7	15.06	6.02	20.37
BH-RA-07/SPT-01	3.90-4.35	ML	0.4	13.6	86.1	16.13	NP	16.13
BH-RA-08/SPT-01	3.00-3.45	SM	0.7	74.8	24.5	NP	NP	13.31
BH-RA-09/SPT-01	2.20-2.65	SM	0.0	69.6	30.4	NP	NP	5.99
BH-RA-10/SPT-01	8.00-8.45	CL-ML	2.8	15.4	81.7	14.77	4.8	16.15
BH-RA-11/SPT-01	3.00-3.45	CL	0.1	5.3	94.6	23.37	9.90	23.90
BH-RA-12/SPT-01	2.00-2.45	SM	3.0	58.1	38.9	NP	NP	6.78
BH-RA-14/SPT-01	1.50-1.95	SM	18.8	54.6	26.7	NP	NP	11.80
BH-RA-14/SPT-02	3.00-3.45	SM	0.0	73.8	26.2	NP	NP	3.84
BH-RA-14/SPT-03	9.00-9.45	CL-ML	0.3	40.4	59.3	11.86	4.93	18.08
BH-RA-14	9.00	ML	0.0	49.0	51.0	NP	NP	18.70
BH-RA-06	8.25-8.65	ML	0.0	13.0	87.0	18.0	NP	19.30
BH-RA-09	9.00-9.60	ML	0.0	15.0	85.0	18.0	NP	18.80
BH-RA-15	5.80	SM	0.0	70.0	30.0	NP	NP	18.90
BH-RA-01	3.15	SM	0.0	53.0	47.0	NP	NP	18.90
BH-RA-08	4.00	SM	0.0	54.0	46.0	NP	NP	15.80
BH-RA-10	8.45-9.05	ML	0.0	11.0	89.0	15.0	NP	17.40

### Abreviaturas:

Prof.: Profundidad

IP: Índice plástico

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

LL: Límite líquido

NP: No presenta

Cont. Hum.: Contenido de humedad

### Ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (U)

Para determinar la resistencia de los materiales extraídos de las calicatas se realizaron 02 ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) con medición de presión de poros. El ensayo fue ejecutado siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D4767-3. En la Tabla N°16 se presenta el resumen de este ensayo.

### Tabla N°16

*Resumen de ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado (CU)*

Código de Perforación	Prof. (m)	Clasif. SUCS	Dens. Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Cont. Hum. (%)	Porcentaje de deformación (%)	Resistencia no drenada $S_u$			Esfuerzos efectivos	
						100kPa	200kPa	400kPa	C' (kPa)	$\phi'$ (°)
BH-RA-01	3.15	SM	2.24	14.11	15	111	347	619	0.0	34.0
BH-RA-08	4.00	SM	2.25	15.22	15	215	365	689	12.0	33.0

**Abreviaturas:**

Clasif.: Clasificación

Dens.: Densidad

SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

Cont. Hum.: Contenido de humedad

Prof.: Profundidad

c: Cohesión

**Ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU)**

Para determinar la resistencia de los materiales extraído de las calicatas se realizaron 05 ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU) con medición de presión de poros. El ensayo fue ejecutado siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D2850, D4767, D7181. En la Tabla N°17 se presenta el resumen de este ensayo.

**Tabla N°17**

*Resumen de ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado*

Código de Perforación	Prof. (m)	Clasif. SUCS	Dens. Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Cont. Hum. (%)	Porcentaje de deformación (%)	Esfuerzos Totales	
						C (kPa)	$\phi$ (°)
BH-RA-06	8.25-8.65	ML	2.08	20.54	18	55.0	0.0
BH-RA-09	9.0-9.60	ML	2.14	22.67	18	116.0	0.0
BH-RA-14	9.0	ML	1.95	21.35	18	129.0	0.0
BH-RA-14	5.8	SM	2.09	16.60	18	39.0	26.0
BH-RA-08	8.45-9.05	ML	2.25	17.46	18	57.0	17.0

**Abreviaturas:**

Clasif.: Clasificación

Dens.: Densidad

SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

Cont. Hum.: Contenido de humedad

Prof.: Profundidad

c: Cohesión

**Ensayo de carga puntual**

Se efectuaron 03 ensayos de carga puntual en muestras de roca con la finalidad de obtener su resistencia compresiva. Estos ensayos siguen los procedimientos de la norma ASTM D5731 y los resultados se presentan en la Tabla N°18 en términos de la resistencia a la compresión no confinada equivalente a  $\sigma_c$  y resistencia de la roca.

### Tabla N°18

#### *Resumen de ensayos de carga puntual*

Código de Perforación		Muestra	Profundidad (m)	Carga puntual		Grado de dureza
COINGEC	Incotec			IS(50) (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	
TP-HP-01	C-01	M-3	3.20-3.30	0.51	12.18	R2
-	-	Roca_M-1	Superficial	4.97	118.35	R5
-	-	Roca_M-2	Superficial	2.84	68.16	R4

*Fuente: Propia*

### Clasificación de la Presa – CDA

#### Condición hidrológica

Las pautas del CDA, recomiendan que las evaluaciones de rotura de presas consideren dos condiciones hidrológicas iniciales:

- Sunny-day failure (Operación Normal): Corresponde a una falla repentina en la presa que ocurre durante operación normal, que puede ser causada por erosión interna, sismos, u operación incorrecta que conduzca el deslizamiento de los relaves.
- “Flood-induced failure” (Evento Hidrológico Extremo): Corresponde a una falla producto de una inundación natural de magnitud mayor. En este caso se determina el efecto incremental que produce derrame de agua y relaves aguas abajo de los muros.

Para el caso de evento hidrológico extremo, el depósito de relaves tiene o no capacidad de almacenamiento o control, se analiza la zona afectada aguas abajo en el caso hipotético de que el muro pierde resistencia y se genere un desbordamiento u deslizamiento.

En consecuencia, como parte del presente estudio se evalúa ambas condiciones hidrológicas: operación normal y evento hidrológico extremo.

### **Modos de falla asociados a la condición de operación normal**

Se han evaluado tres modos de falla, de acuerdo a lo indicado por James et en el documento “*Summary of the 2014 and 2015 Tailings Dam Breach Workshop of the Canadian Dam Association*” (Ref. 6).

- **Falla de taludes:** Este modo de falla incluye fallas de taludes del tipo rotacionales y traslacionales, en condiciones estáticas y sísmicas, además de licuación del material constituyente del muro.

Evaluación: Una falla de taludes es factible, por lo que es considerada en la presente evaluación.

- **Falla de fundación:** Este modo de falla incluye fallas deslizamientos y asentamientos del suelo de fundación, producto de una disminución de su resistencia. Los mecanismos gatillantes están asociados a sobrestimación de la resistencia, erosión interna, y licuación del suelo de fundación.

Evaluación: Debido a la heterogeneidad del suelo de fundación, se asume conservadoramente que la ocurrencia de este tipo de falla es probable en estratos de mayor concentración de finos.

- **Falla por erosión interna:** Este modo de falla considera que existe un nivel freático o alta saturación en el cuerpo de las relaveras. Se produce erosión interna del material, que gatilla el desconfinamiento, pérdida de resistencia y vaciamiento de los relaves.

Evaluación: Debido a que el relave está saturado y no hay un manejo efectivo del agua superficial, la ocurrencia de este tipo de falla es probable.

Para efectos de determinar las características de la brecha y potenciales volúmenes de escurrimiento de relave se considera el resultado más desfavorable entre las fallas posibles.

El caso más desfavorable corresponde a aquel que presenta un mayor volumen total de vaciamiento.

### **Modos de falla asociados a la condición evento extraordinario**

En evento extraordinario, se ha asumido que el tipo de falla más factible corresponde a overtopping por lluvias extraordinarias.

Es importante enfatizar que este evento constituye un caso catastrófico de baja a nula probabilidad de ocurrencia. Aunque es improbable que ocurra una falla por desbordamiento, este escenario es el que provee los resultados más conservadores y fue asumido como el modo de falla que se desarrolla para este escenario.

Falla por overtopping: Este modo de falla considera que el volumen el relave durante el evento hidrológico de diseño más un porcentaje de relave escurren aguas abajo del depósito.

### **Clasificación Final**

De acuerdo al definido con las condiciones geográficas, los modos de falla y el estado actual de las relaveras Antiguas, se considera lo siguiente:

- El modo de falla sería escurrimiento por la condición del relave.
- La distancia para recorrer podría llegar a la zona baja de la quebrada en la hondonada de las pozas de tratamiento de agua
- No existe población permanente, aguas abajo, solo temporal para el mantenimiento de las pozas en épocas secas
- No se estima pérdidas de vida.
- Se estima sólo pérdida marginal de hábitat

- Pérdidas de áreas de trabajo estacional, o rutas de transporte de uso frecuente.

Por lo expuesto las relaveras Antiguas se clasifican como riesgo significativo, con un periodo de retorno de 150 años, considerando la temporalidad de la estructura, el cual será trasladado a otro lugar.

**Tabla N°19**

*Clasificación de la presa*

Clasificación de la presa	Población en riesgo	Pérdidas de vida	Valores ambientales y culturales	Infraestructura y económica
Baja	Ninguna	0	Mínimas pérdidas de corto plazo. Ninguna pérdida de largo plazo.	Bajas pérdidas económicas. El área contiene limitada infraestructura o servicios.
Significativa	Solo temporal	No especificado	Pérdida no significativa o deterioro del hábitat silvestre o acuático. Sólo pérdida marginal de hábitat. Altamente posible la restauración o compensación.	Pérdidas de la estructura recreacional, áreas de trabajo estacional, o rutas de transporte poco usadas.
Alta	Permanente	Menor a 10	Pérdida significativa o deterioro importante del hábitat silvestre o acuático. Altamente posible la restauración o compensación.	Pérdidas económicas altas de la infraestructura, transporte público, e infraestructura comercial.
Muy Alta	Permanente	Menor a 100	Pérdida significativa o deterioro crítico del hábitat silvestre o acuático. Restauración o compensación posible pero no práctica.	Pérdidas económicas muy altas que afectan importantes infraestructuras y servicios (autopistas, infraestructura industrial, infraestructura de almacenamiento de sustancias peligrosas).
Extrema	Permanente	Mas de 100	Gran pérdida y deterioro crítico del hábitat silvestre o acuático. Restauración o compensación imposible.	Extremas pérdidas económicas que afectan infraestructuras y/o servicios críticas (hospitales, grandes complejos industriales, grandes instalaciones de almacenamientos de sustancias peligrosas).

*Nota: Se muestra la clasificación de presa por consecuencia de rotura (CDA,2014)*

**Tabla N°20**

*Definición de periodos de retorno de lluvia y sismo*

Clasificación	Presas almacenamiento de agua (CDA, 2013) Presas mineras (CDA, 2014)	
	Avenida	Terremoto
Baja	1/100	1/100
Significativa	Entre 1/100 y 1/1000	Entre 1/100 y 1/1000
Alta	1/3 del rango entre 1/1000 y PMF	1/2475
Muy Alta	2/3 del rango entre 1/1000 y PMF	1/2 del rango entre 1/2475 y 1/10 000 o MCE
Extrema	PMF	1/10 000 o MCE

*Nota: Presas de almacenamiento de agua (CDA,2013)  
Presas mineras (CDA, 2014)*

### **Criterios de análisis**

Los criterios de análisis fueron definidos en el presente estudio, han servido como base para el desarrollo de la evaluación geotécnica de las relaveras antiguas. El cual se encuentra validado por la clasificación del riesgo (CDA) y el análisis de estabilidad de taludes comprendida en la presa mediante el método de equilibrio limite.

A continuación, se presenta la descripción de los criterios de análisis, la unidad de medida, el criterio utilizado en este estudio y la fuente que proporcionó el criterio.

**Tabla N°21**

*Fuentes de criterios de diseño*

Origen	Denominación
Recomendaciones de Consultor	A
Información o Criterio proporcionado por Cliente	B
Literatura y/o Practica de la Industria	C
Criterio basado en cálculos de procesos	D

*Nota: Denominaciones de fuentes de criterios de diseño según su origen*

**Tabla N°22**

*Crterios de diseño*

Descripción	Unidad	Criterio usado	Fuente
<b>Depósito de relaves Azulcocha</b>			
<b>Estabilidad física</b>			
Modelo de análisis de estabilidad (método de equilibrio límite)	modelo	Spencer	A
Período de retorno del sismo de diseño (ver nota 1)	años	500	A/B
Coefficiente sísmico para el análisis pseudo-estático a largo plazo (ver nota 2)	adimensional	0.164	A/D
Estabilidad estática a largo plazo	FS	1.5	A/C/D
Estabilidad pseudoestática	FS	1.0	A/C/D
Análisis de desplazamientos permanentes inducidos por sismo	si FS pseudo-estático < 1		A/C/D

*Notas:* De acuerdo a las condiciones de riesgo se clasifica como significativa y el sismo corresponde al de 150 años.

La asignación del coeficiente sísmico fue obtenida igual al ½ del PGA para el recrecimiento de la presa de relaves. El coeficiente sísmico se aplicará en el análisis pseudoestático.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### Consideraciones de la evaluación geotécnica

#### Generalidades

En esta sección se describen los análisis geotécnicos realizados para garantizar la estabilidad de las Relaveras Antiguas. Estos análisis se desarrollaron considerando la información de estudios anteriores y datos obtenidos de la evaluación geotécnica realizada. Gracias a ello se pudo caracterizar adecuadamente los materiales que conforman las relaveras Antiguas y su cimentación.

El análisis se realizó para una sección crítica, teniendo en cuenta fallas rotacionales o circulares tanto en condiciones estáticas y pseudoestáticas, este último mencionado para un periodo de retorno de 500 años.

#### Definición de los parámetros geotécnicos

Con base en la revisión de información, se consideraron los siguientes parámetros de resistencia cortante de los materiales incluidos en el modelo predictivo del comportamiento, resumidos en la Tabla N°23

**Tabla N°23**

*Resumen de los parámetros de resistencia cortante*

Material	$\gamma_{total}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzos efectivos		Esfuerzos totales		Ru
		c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c (kPa)	$\phi$ (°)	
Relave grueso	20	0	33			0.1
Relave fino	20	0	32	39	17	0.1
Relleno no estructural	22	0	34			
Roca F. Jumasha	24	1000	47			

*Nota:*

$\gamma_{total}$ : Peso específico total del suelo

c': Cohesión efectiva

F. Formación

$\gamma_{esp.}$ : Peso específico saturado del suelo

$\phi'$ : Ángulo de fricción efectiva

k: Permeabilidad

## **Análisis de estabilidad física por el método de equilibrio límite**

Para el análisis de estabilidad física de los taludes en las condiciones existentes y proyectadas, se analizó las secciones 1-1 a la 10-10, que presenta las condiciones más críticas de pendiente y altura de las relaveras antiguas.

### **Metodología de análisis**

En el análisis mencionado anteriormente se utilizó el programa de cómputo Slide versión 6.0 (Rocscience, 2010), el cual permite modelar configuraciones complejas, definir modelos para el suelo y roca, tales como: Mohr-Coulomb, Hoek-Brown anisotrópico, Hoek-Brown generalizado, Barton-Bandis, función esfuerzo normal-corte, entre otros. El cálculo del factor de seguridad se realiza en secciones donde se tienen las condiciones más críticas, permitiendo llevar a cabo un análisis de forma bidimensional y aproximando el análisis a un estado de deformación plana. La metodología está basada en el método de equilibrio límite, incorporando diversos métodos simplificados y rigurosos para el cálculo del factor de seguridad (Bishop, Spencer, Morgenster-Price, entre otros). El programa tiene la opción de utilizar diferentes métodos de análisis de estabilidad de manera simultánea; sin embargo, para el presente análisis se utilizó el método de Spencer, el cual satisface simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos) y es considerado en comparación con otros métodos el más estable numéricamente, además este método de análisis satisface superficies de falla circulares y no circulares.

Como hipótesis de análisis se considera que las propiedades de los materiales que conforman la estructura son homogéneas e isotrópicas, y que el colapso se produciría como resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento. Cada material tiene sus características físicas y propiedades mecánicas. En el análisis pseudoestático se considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una fuerza horizontal igual a un

coeficiente sísmico multiplicado por el peso de la masa deslizante, a fin de tomar en cuenta de manera aproximada y simplificada el efecto de las fuerzas inerciales producidas por el terremoto de diseño.

### **Criterios de análisis geotécnico**

Los mínimos factores de seguridad considerados en los análisis de estabilidad física de taludes a largo plazo cumplen con los mínimos requeridos según las recomendaciones de las agencias United States Society of Dam (USSD) y United States Bureau of Reclamation (USBR). En el análisis se consideraron los siguientes factores de seguridad:

#### **Tabla N°24**

##### *Mínimos factores de seguridad requeridos*

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Criterio usado</b>
Factor de seguridad estabilidad estática a largo plazo	FS	1.5
Factor de seguridad estabilidad pseudoestática*	FS	1.0

*Nota:* (\*) Para un periodo de retorno determinado

Cabe señalar que un factor de seguridad pseudoestático menor a 1.0 no significa que la presa de relaves falle durante un evento sísmico, lo que probablemente ocurra es que se desarrollaren desplazamientos mínimos que no producirán daños permanentes asociados al sismo de diseño. En el caso de que el factor de seguridad pseudoestático sea menor o cercano a la unidad se deberán verificar los desplazamientos permanentes inducidos por el sismo de diseño para verificar si estos son o no admisibles por la estructura y definir la estabilidad en función de un criterio más riguroso.

### **Condiciones de análisis**

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para los análisis de estabilidad:

- El análisis consideró la configuración más crítica representada por las secciones 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5', 6-6', 7-7', 8-8', 9-9' y 10-10'.

- Las propiedades y parámetros de los materiales fueron obtenidos a partir de la revisión de información de los estudios previos y las investigaciones geotécnicas desarrolladas en el presente servicio, resumidos en la Tabla N°23 y N°24
- Los análisis de la estabilidad física fueron realizados por el método de equilibrio límite, utilizando el procedimiento riguroso de Spencer para el cálculo del factor de seguridad, satisfaciendo simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos), además de ser considerado el más estable numéricamente.
- Los factores de seguridad obtenidos de los análisis fueron comparados con los mínimos establecidos en los criterios de análisis del estudio.
- El análisis de la estabilidad física fue desarrollado en condiciones estáticas y pseudoestáticas para condiciones de un evento sísmico de período de retorno de 150, 500, 1000 y 2475 años, representando la condición de largo plazo para la presa de relaves para la condición actual. Se consideraron fallas tipo rotacional o circular en condición local y global a través de la presa.
- La condición pseudoestática para periodos de retorno de 150, 500, 1000 y 2475 años fueron evaluados con un coeficiente sísmico de 0.097, 0.164, 0.204 y 0.271 respectivamente, que corresponde al 50% del PGA en un perfil de suelo tipo B (roca), según la clasificación del IBC (2012).

### **Resultados obtenidos**

En la Tabla N°25 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad física a largo plazo en condición estática y pseudoestática para un periodo de retorno igual a 500 años.

### **Tabla N°25**

*Resumen de resultados del análisis de estabilidad física*

Área	Sección	Superficie de falla	Factor de seguridad			
			Estático C. Actual	Estático C. Cierre	Pseudoestático C. Actual	Pseudoestático. C. Cierre
Relaveras Antiguas	Sección 1-1	Circular	1.245	1.594	0.818	1.020
	Sección 2-2	Circular	1.462	1.580	0.962	1.001
	Sección 3-3	Circular	2.404	2.108	1.285	1.257
	Sección 4-4	Circular	1.339	1.629	0.854	1.015
	Sección 5-5	Circular	1.124	1.828	0.753	1.390
	Sección 6-6	Circular	1.498	1.663	1.015	1.038
	Sección 7-7	Circular	1.629	1.817	0.965	1.059
	Sección 8-8	Circular	1.629	1.806	0.932	1.029
	Sección 9-9	Circular	1.798	1.844	1.095	1.099
	Sección 10-10	Circular	1.444	1.707	0.951	1.066

*Nota: La condición pseudoestático fue realizada con un coeficiente sísmico igual de 0.164 considerando parámetros para largo plazo.*

De los resultados presentados en la Tabla N°25 se observa que los factores de seguridad obtenidos en la mayoría de las secciones son menores que los mínimos recomendados en los criterios de diseño establecidos para las condiciones analizadas (Tablas 22 y 23). En las condiciones pseudoestáticas se observa que los análisis para una superficie circular han dado factores de seguridad por encima de 1.0. Las secciones que presentan valores inferiores a los mínimos requeridos son la sección 1-1, 2-2, 4-4, 5-5, 7-7, 8-8 y 10-10. Por lo tanto, se estima reforzar estos taludes con un muro al pie del talud con cobertura de relleno estructural de tal manera que cumplan los factores de seguridad mínimos y se muestran que todas las secciones ya cumplen con los mínimos requeridos.

En el Anexo N°7 muestra un ejemplo de las salidas del programa Slide, el cual ilustra los resultados del análisis de estabilidad de taludes y además contiene información de los materiales y ubicación de la superficie de falla crítica con el menor factor de seguridad.

### **Corte simple y eliminación de material**

El corte de material para estabilizar se encuentra en la parte frontal de las relaveras antiguas.

El material no apto, se encuentra conformado por el relave y relleno no conformado, los

cuales no cumplen con las características geotécnicas para la estabilización. Este material debe ser cortado y retirado hasta encontrar una superficie o talud que cumpla con las características geotécnicas necesarias para una buena cimentación, es decir, una compacidad o consistencia adecuada, a fin de garantizar la estabilidad física.

Antes de la colocación de los rellenos necesarios para la estabilidad física, se tendrá que remover los materiales no apropiados para la cimentación y taludes, tales como: arenas, suelos sueltos, arcillas y limos blandos. El criterio de determinación de estos niveles se basa principalmente en los análisis y en encontrar un basamento rígido o no cedente que permita soportar las sollicitaciones de carga del relleno colocado en la estabilidad física, a fin de evitar los asentamientos diferenciales pronunciados y garantizar la estabilidad del talud del mismo. Estos materiales removidos serán dispuestos en el mismo depósito indicado por el cliente.

En la Tabla N° 26 se muestra el volumen de corte del material no apto para la estabilidad física.

### **Tabla N°26**

#### *Volumen de corte*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (m3)(*)</b>
Volumen de material de corte	5,300
<b>Volumen total</b>	<b>5,300</b>

*Nota: Las cantidades corresponden a valores netos, antes de colocar la cobertura*

### **Construcción de contrafuertes de estabilización**

El proyecto contempla también la construcción de contrafuertes en la zona baja para fines de estabilidad física de las relaveras antiguas.

Las dimensiones del contrafuerte son variables, con ancho de cresta de 3.0 m. Los taludes aguas arriba y abajo serán de 2H:1V.

### **Tabla N°27**

*Características de los contrafuertes*

Descripción	Cantidad
Relleno estructural	4,600 m <sup>3</sup>
Concreto Ciclope	500 m <sup>3</sup>

*Nota: Se muestran las cantidades de los materiales de los contrafuertes*

**Sistema de cobertura**

El sistema de revestimiento para evitar erosión y saturación del material existente en las relaveras antiguas, considera la zona de la plataforma, la zona perimétrica hasta el contradique, el sistema de revestimiento de la zona perimétrica y el contradique está anclado en el camino perimetral con cota máxima de 4237 msnm. El sistema de revestimiento del depósito consistirá en la colocación de arcilla y relleno granular sobre la lámina de geomembrana lisa de HDPE de 2 mm de espesor, colocados en ese orden.

La totalidad de superficie revestida será 0.8 ha aproximadamente. En toda la zona de la plataforma se realizará el anclaje del revestimiento en el camino perimetral de ancho 3 m y con cota 4536 msnm.

Previo a la colocación del sistema de revestimiento se deberá garantizar que la superficie de apoyo no presente gravas angulosas de tamaño mayor a 25 mm, los que podrían dañar al revestimiento durante su instalación. Para la fijación del sistema de revestimiento, en la zona de la plataforma, se hará uso de zanjas de anclaje, las cuales se dispondrán a lo largo del camino perimetral a lo largo del contradique.

**Tabla N° 28**

*Cantidad de geosintéticos utilizados en el sistema de revestimiento*

Descripción	Cantidad
Suelo de baja permeabilidad	8,000.0 m <sup>3</sup>
Relleno con suelo granular	8,000.0 m <sup>3</sup>
Geoceldas	4,000.0 m <sup>2</sup>

*Nota: Las cantidades corresponden a valores netos, antes del factor de crecimiento.*

## Cobertura de cierre

La cobertura de cierre se colocará sobre el desmonte, después de la conformación de la geometría proyectada; es decir, sobre la plataforma final del depósito y taludes con pendientes entre 1.5H:1V a 2.0H:1V. Su función principal es cubrir la superficie existente evitando filtraciones e integrar paisajísticamente cada componente con el medio ambiente.

El modelamiento numérico de esta cobertura de cierre se desarrolló con ayuda del programa Visual HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) versión 2.2.

La Figura N°11 se muestra los elementos que constituyen la cobertura prevista para los depósitos de desmontes.

### Figura N°11

#### *Elementos de cobertura de cierre*

Cobertura Drenante	<b>Gravas ligeramente arcillosas (GP-GC) de 0.2 m de espesor mínimo. Estrato permeable que actuará como cobertura final y capa drenante</b>
(Cobertura de baja permeabilidad) Arcilla	Capa de material arcilloso de 0.20 m de espesor mínimo. Estrato impermeable cuya finalidad es crear una barrera que reduzca al máximo el ingreso de oxígeno y minimice la infiltración de agua hacia el componente
Geomembrana	Geomembrana lisa de 0.5 mm (Instalada)
Relave	Relave, SM, SC, ML

*Fuente: Propia*

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se determinó que la condición pseudoestática para periodos de retorno de 475 años fue evaluada con un coeficiente sísmico de 0.164, que corresponde 1/2 del del valor del PGA.
- Se determino que el calculo de factor de seguridad se realiza en las secciones donde se tienen las condiciones mas criticas permitiendo llevar a cabo un análisis de forma bidimensional y aproximando el análisis a un estado de deformación plana.
- Se determino que los resultados del análisis de estabilidad física de taludes nos indican que en la última etapa los factores de seguridad son mayores a los valores mínimos indicados en los criterios de diseño geotécnico, por lo cual, estas estructuras analizadas presentan condiciones favorables de estabilidad física para las condiciones estáticas y pseudoestáticas de cierre evaluadas.

### Recomendaciones

- Se recomienda realizar ensayos de laboratorio con la finalidad de caracterizar con mayor detalle las propiedades de resistencia al corte de los materiales que conforman el modelo geotécnico del cuerpo del relave. Los ensayos se realizaron en el laboratorio geotécnico de GECAT Ingeniería SAC, los ensayos ejecutados consistieron en clasificación SUCS.
- Se recomienda que para el análisis de la estabilidad física que fue desarrollado en condiciones estáticas y pseudoestáticas para un evento sísmico de período de retorno de 2500 años, 1000 años y 475 años, representando la condición de largo plazo y un periodo de retorno de 150 años representando la condición de corto plazo, se consideren fallas tipo rotacional o circular en condición local y global a través del cuerpo de los depósitos de relaves.

- Se recomienda usar el método de Spencer, el cual satisface simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos) y es considerado en comparación con otros métodos el más estable numéricamente, además este método de análisis satisface superficies de falla circulares y no circulares.

## REFERENCIAS

- Cedron, M. (2013). Elaboración de criterios para la transformación de pasivos mineros en activos socio - ambientales sostenibles. Recuperado de [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4654/CEDRON\\_LASSUS\\_MARIO\\_EL\\_ABORACION\\_MINEROS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4654/CEDRON_LASSUS_MARIO_EL_ABORACION_MINEROS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Wang, X.; Hongbin, Z.; Wang, J. y Ping, L. (2018). The Stability of Tailings Dams under Dry-Wet Cycles: A Case Study in Luonan, China. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1048/htm>
- Morales, A y Hantke, D. (2020). Guía metodológica de cierre de minas. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46532/S2000767\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46532/S2000767_es.pdf)
- Gutiérrez, F. (2017). Evaluación de herramientas para el análisis de estabilidad física de una presa de relaves espesados. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148601>
- Carvajal, M. (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152946>
- Huamán, J. (2018). Análisis de estabilidad física del depósito de relaves Manalave para su recrecimiento vertical con relave en pasta. Recuperado de [http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/783/1/T026\\_41279759\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/783/1/T026_41279759_T.pdf)
- Aguirre, R. (2017). Análisis de estabilidad física del depósito de relaves N° 5 de la concesión de beneficio belén de minera titan del Perú S.R.L. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2538>
- Mary y Aerly (2021). Estabilidad física para la explotación de agregados en la empresa Minera no Metalica El Milagro – Cajamarca 2021. Recuperado de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75638?show=full>
- Cesar y Ever. (2016). Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de cuenca Huancavelica. Recuperado de <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1935>

## ANEXOS

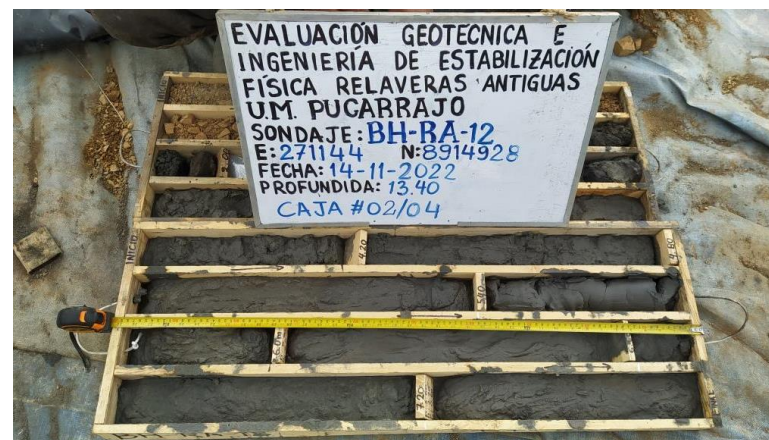
### ANEXO N° 1: Investigaciones de campo



Foto N° 1: Vista panorámica del Sondaje BH-RA-12.



Caja N° 01.



Caja N° 02.



Caja N° 03.



Caja N° 04.

Foto N° 2: Registro de cajas de la perforación BH-RA-12.

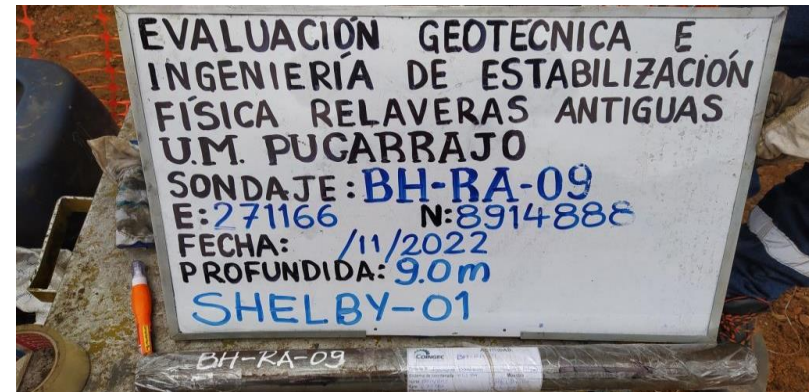
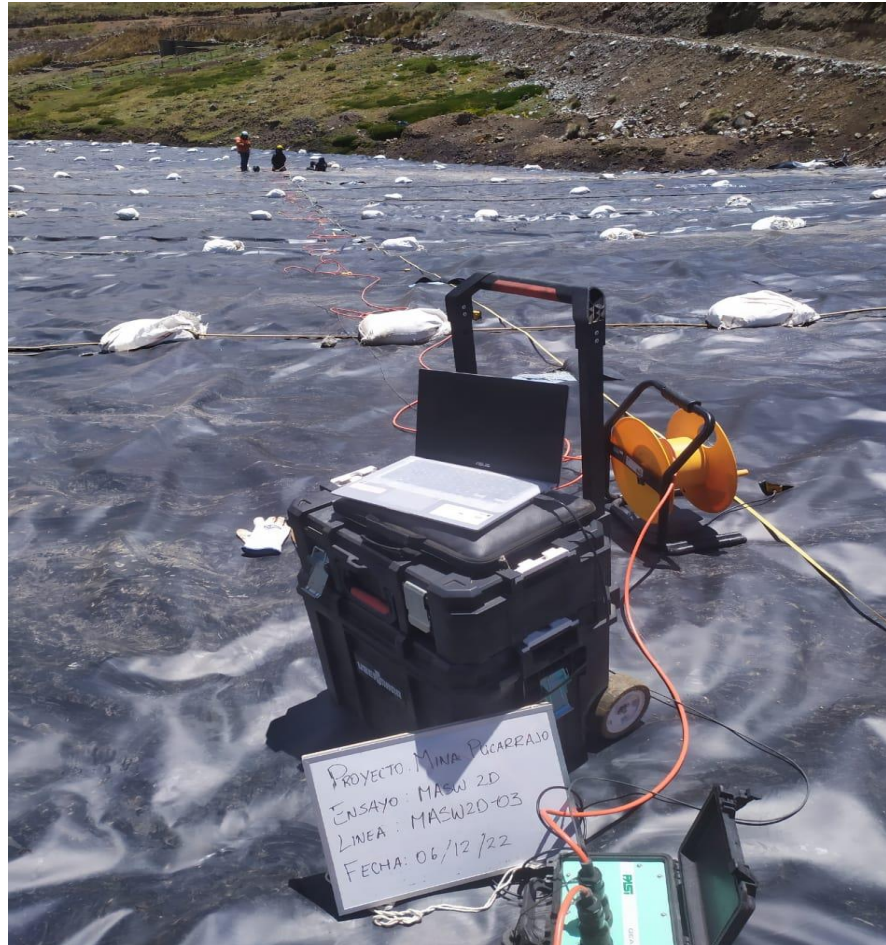


Foto N° 3: Ejecución de ensayo SPT y recuperación de muestra en tubo Shelby en BH-RA-09



**Foto N° 4:** Vista panorámica del Ensayo DPL-RA-01.











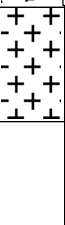
**Foto N° 5:** Vista panorámica del Ensayo MASW2D-03.




**Foto N° 6:** Vista panorámica del Ensayo Tomografía Eléctrica TRE-02

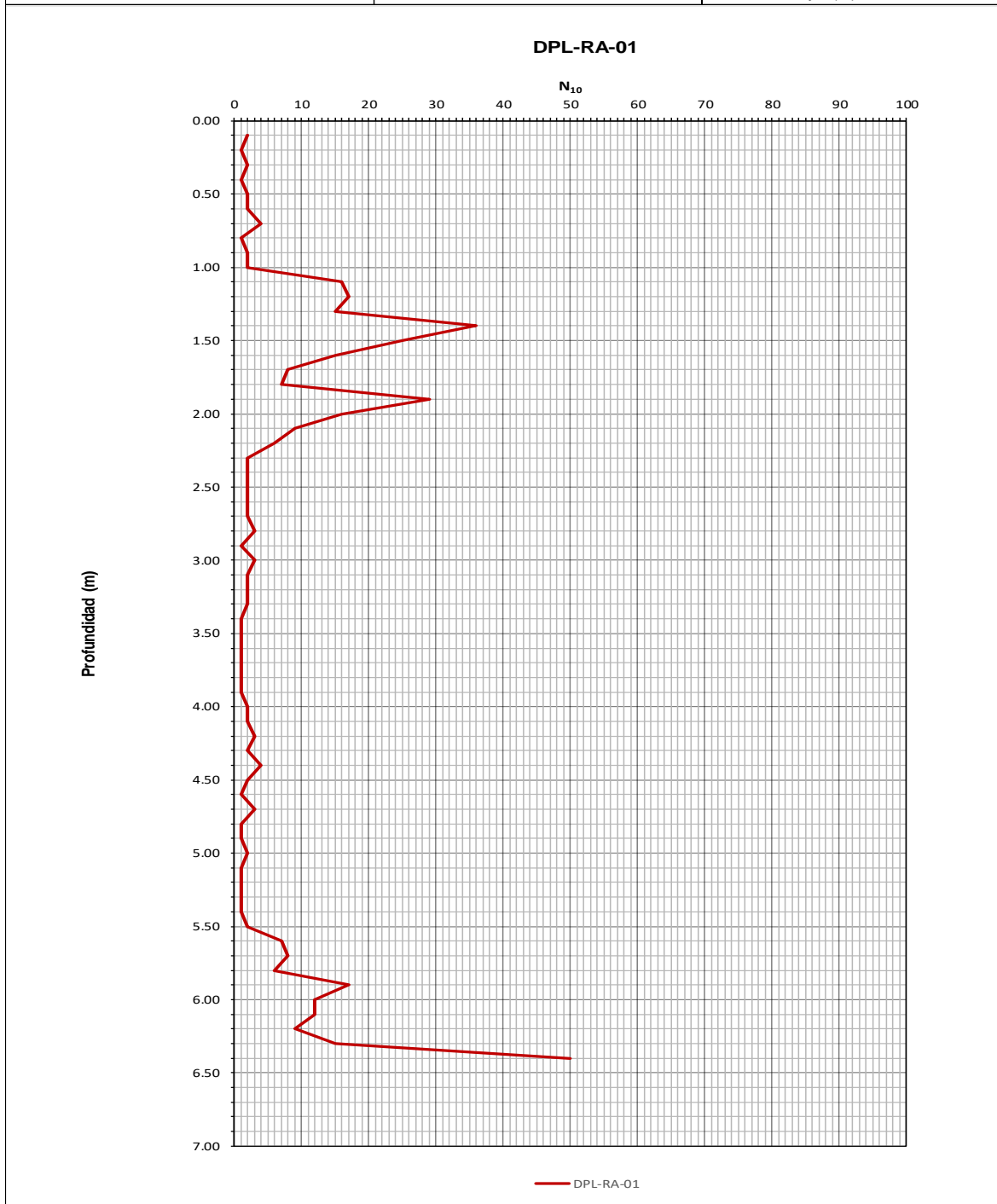
ANEXO N° 2: Registro de perforaciones


 Ingeniería en Geotécnia			Ubicación: : U.M. Pucarrajo Fecha de inicio : 28/11/2022 Fecha de término : 28/11/2022 Tipo de perforación : Diamantina Equipo de Perforació : Yugong Dimensión : HQ/HW Registrado por : RBBR Azimut/Buzamiento : - / -90°				<b>SONDAJE BH-RA-01</b> Página 1 de 1			
Evaluación Geotécnica e Ingeniería de Estabilización Física de Relaveras Antiguas - U.M. Pucarrajo.							Sistema de coordenadas : WGS-84 Norte : 8,914,669.0 Este : 271,217.0 Elevación (m.s.n.m.) : 4,543.4 Nivel freático (m) : NSO. Prof. perforación (m) : 9.15			
Proyecto N° 19.10.07.07-60-CO-ITE-001										
Profundidad (m)	SUCS	Gráfico	Descripción de campo	N° de muestra	Muestra rec. (frac.)	N° de golpes (cada 6")	25	50	75	Observaciones
0	GP		Grava pobremente gradada, no plástica, compacidad densa, húmedo, color pardo grisáceo, estructura homogénea. Otros: Grava subangulosa con Tm = 2".							Suelo antrópico.
1	SP		Arena pobremente gradada, no plástica, compacidad densa a suelta, húmeda, color gris verdosa, estructura homogénea. Otros: Arena con tamaño de grano medio.	SPT-01 h= 2.20	45/45	2/3/4	7			Material de relave. Se realizó un muestreo tipo Shelby a los 3.15m de profundidad.
2										
3										
4										
5										
6										
7	GP		Grava pobremente gradada, no plástica, compacidad suelta a densa, húmeda, color gris parduzco, estructura homogénea. Otros: Grava subangulosa con Tm = 4".							Suelo residual
8										
9	ROCA		Roca caliza, color gris oscuro. Roca fresca M1. Poco fracturada F3. Roca blanda R2. RQD = 89%.							Basamento rocoso
10			Fin de la perforación.							
11										
12										
13										
14										
15										

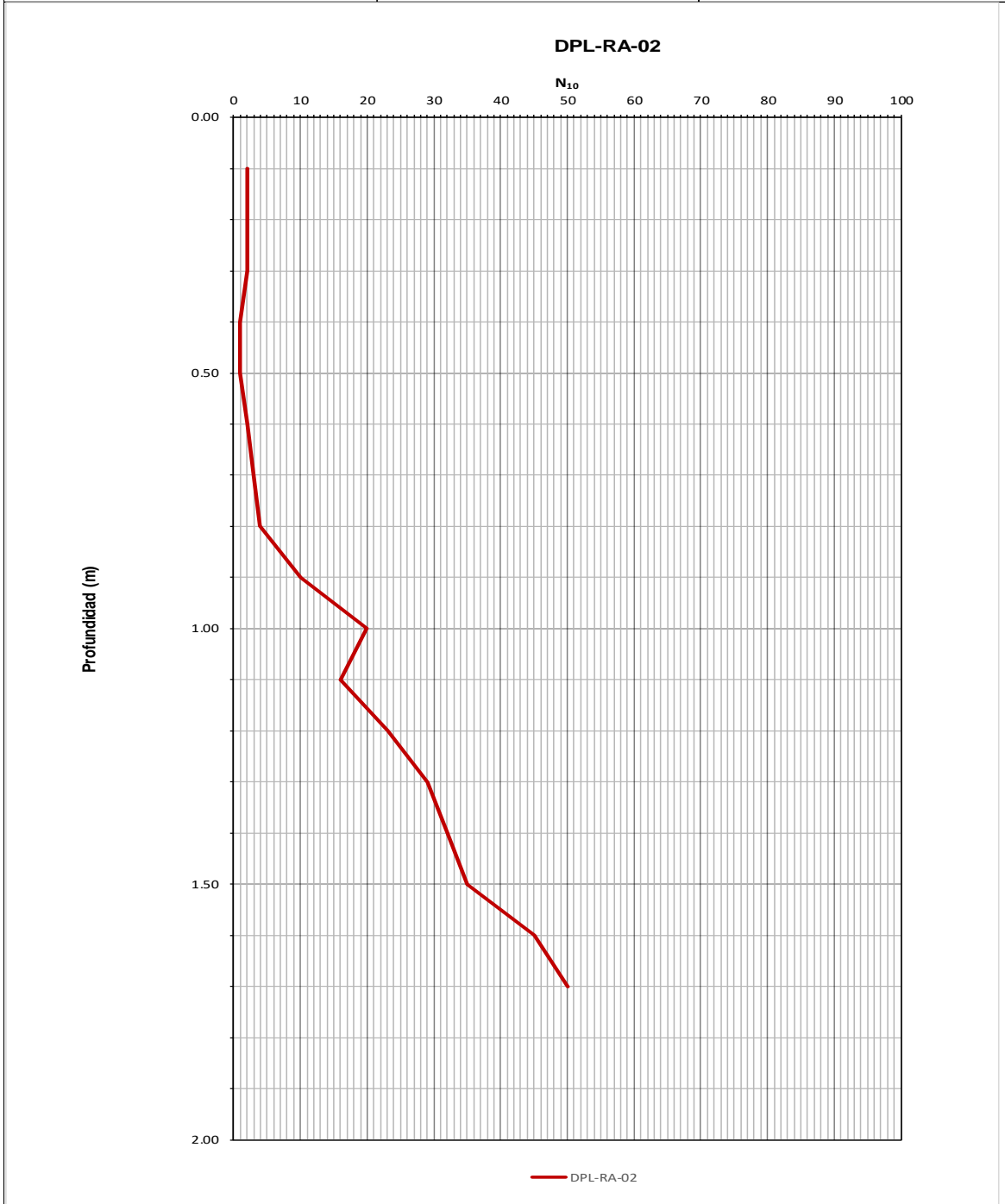
			Ubicación: : U.M. Pucarrajo Fecha de inicio : 27/11/2022 Fecha de término : 28/11/2022 Tipo de perforación : Diamantina Equipo de Perforación : Yugong Dimensión : HQ/HW Registrado por : RBBR Azimut/Buzamiento : - / -90°				<b>SONDAJE BH-RA-02</b> Página 1 de 1			
Evaluación Geotécnica e Ingeniería de Estabilización Física de Relaveras Antiguas - U.M. Pucarrajo.							Sistema de coordenadas : WGS-84 Norte : 8,914,712.1 Este : 271,223.2 Elevación (m.s.n.m.) : 4,545.9 Nivel freático (m) : NSO. Prof. perforación (m) : 9.25			
Proyecto N° 19.10.07.07-60-CO-ITE-001										
Profundidad (m)	SUCS	Gráfico	Descripción de campo	N° de muestra	Muestra rec. (frac.)	N° de golpes (cada 6")	25	50	75	Observaciones
0										
1										
2										
3	SP		Arena pobremente gradada, no plástica, compactación densa a muy suelta, húmeda, color gris verdoso oscuro, estructura homogénea. Otros: Arena con tamaño de grano medio.	SPT-01 h= 4.00	45/45	3/3/4				Material de relave. Se realizó un muestreo tipo Shelby a los 5.05m de profundidad.
4										
5										
6										
7	GP		Grava pobremente gradada, no plástica, compactación suelta, húmeda, color gris claro a oscuro, estructura heterogénea. Otros: Grava angulosa a subangulosa con $T_m = 1.5"$ . Tramo 6.70m - 7.00m presencia de lente de limo con arcilla orgánica, plasticidad media a baja, color marrón oscuro. Tramo 7.00m - 7.30m presencia de matriz de finos en la grava.							Suelo residual.
8	ROCA		Roca arenisca color gris claro. Ligeramente meteorizada M2. Muy fracturado F5, Roca moderadamente dura R3. RQD = 47%.							Basamento rocoso.
9			Fin de la perforación.							
10										
11										
12										
13										
14										
15										

ANEXO N° 3: Registro de DPL

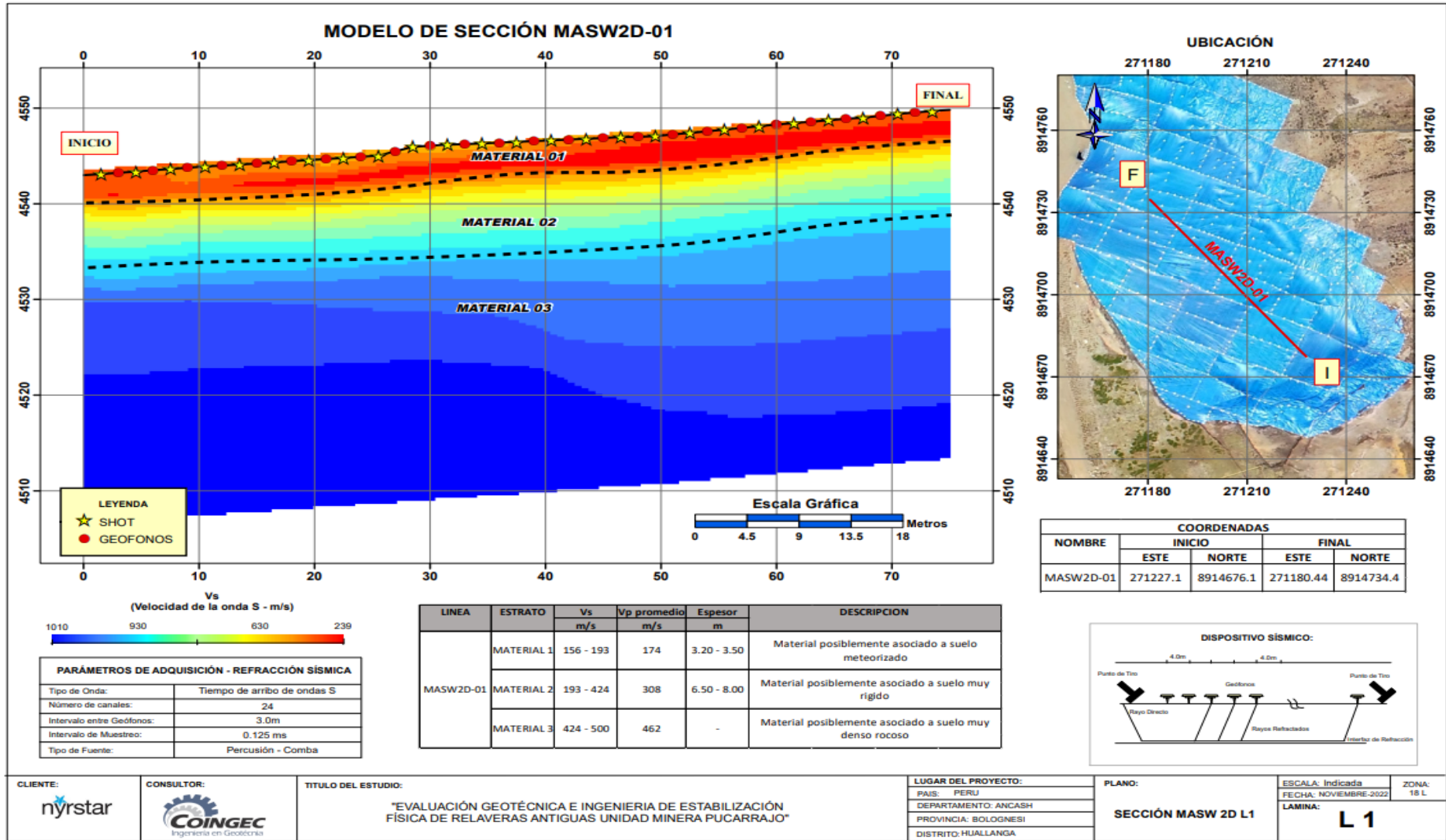
	Ubicación	: U.M. Pucarrajo	<b>DPL-RA-01</b> Página 1 de 1	
	Fecha de inicio	: 05/12/2022		
Evaluación Geotécnica e Ingeniería de Estabilización Física de Relaveras Antiguas - U.M. Pucarrajo.	Fecha de término	: 05/12/2022	Sistema de coordenadas	: WGS-84
	Tipo de equipo	: Manual	Norte	: 8914698.00
	Registrado por	: RBBR	Este	: 271185.00
Proyecto N° 19.10.07.07-60-CO-ITE-001	Condición superficial	: Relavera	Elevación (msnm)	: 4546.10
			Nivel freático (m)	: N.R.
			Prof. de ensayo (m)	: 6.4

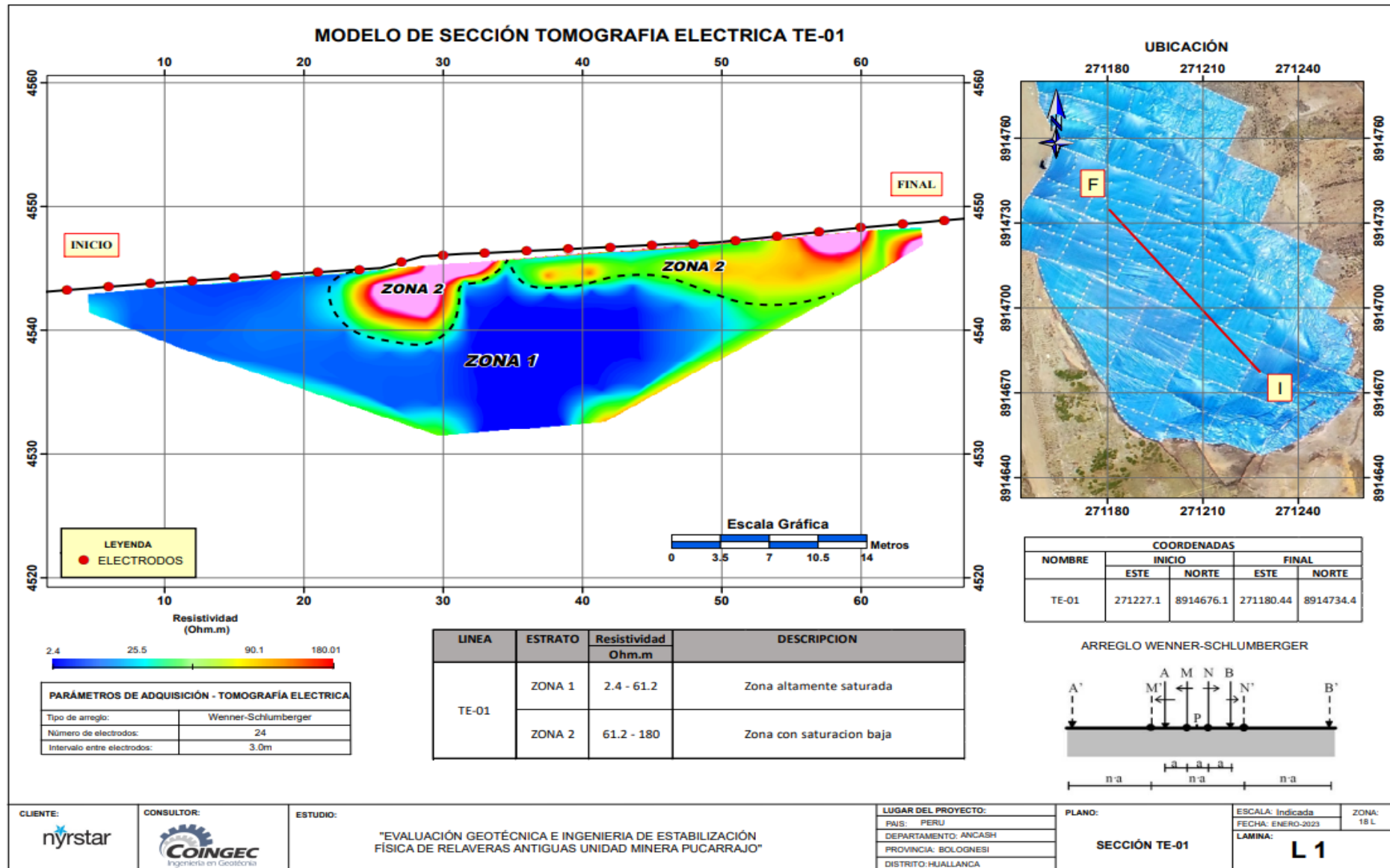


	Ubicación : U.M. Pucarrajo	<b>DPL-RA-02</b>
	Fecha de inicio : 05/12/2022	
Evaluación Geotécnica e Ingeniería de Estabilización Física de Relaveras Antiguas - U.M. Pucarrajo.	Fecha de término : 05/12/2022	Sistema de coordenadas : WGS-84
	Tipo de equipo : Manual	Norte : 8914671.00
Proyecto Nº 19.10.07.07-60-CO-ITE-001	Registrado por : RBBR	Este : 271204.00
	Condición superficial : Relavera	Elevación (msnm) : 4543.60
		Nivel freático (m) : N.R.
		Prof. de ensayo (m) : 1.7



ANEXO N° 4: Ensayos geofísicos





CUENTE:  
**nystar**

CONSULTOR:  
**COINGEC**  
Ingeniería en Geotecnia

ESTUDIO:  
"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA E INGENIERIA DE ESTABILIZACIÓN FÍSICA DE RELAVERAS ANTIGUAS UNIDAD MINERA PUCARRAJO"

LUGAR DEL PROYECTO:  
PAIS: PERU  
DEPARTAMENTO: ANCASH  
PROVINCIA: BOLOGNESI  
DISTRITO: HUALLANCA

PLANO:  
**SECCIÓN TE-01**

ESCALA: Indicada  
FECHA: ENERO-2023  
LAMINA:  
**L 1**

ANEXO N° 6: Ensayos de laboratorio



Consultoría en Geotecnia, Geología,  
Geofísica, Topografía, Pavimentos  
y Servicio de Laboratorio de Suelos,  
Cantera, Concreto y Asfalto

INFORME DE ENSAYO

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, AGREGADOS, CONCRETO Y ASFALTO

SOLICITANTE : Nyrstar Ancash SAC	EXPEDIENTE N° : 190-2022/LAB GECAT INGENIERIA SAC
PROYECTO : Evaluación Geotécnica e Ingeniería de Estabilización Física Relaveras Antiguas	FECHA DE RECEPCIÓN : Lima, 02 de Diciembre del 2022
	UBICACIÓN : Unidad Minera Pucarrajo, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash

REFERENCIA DE LA MUESTRA

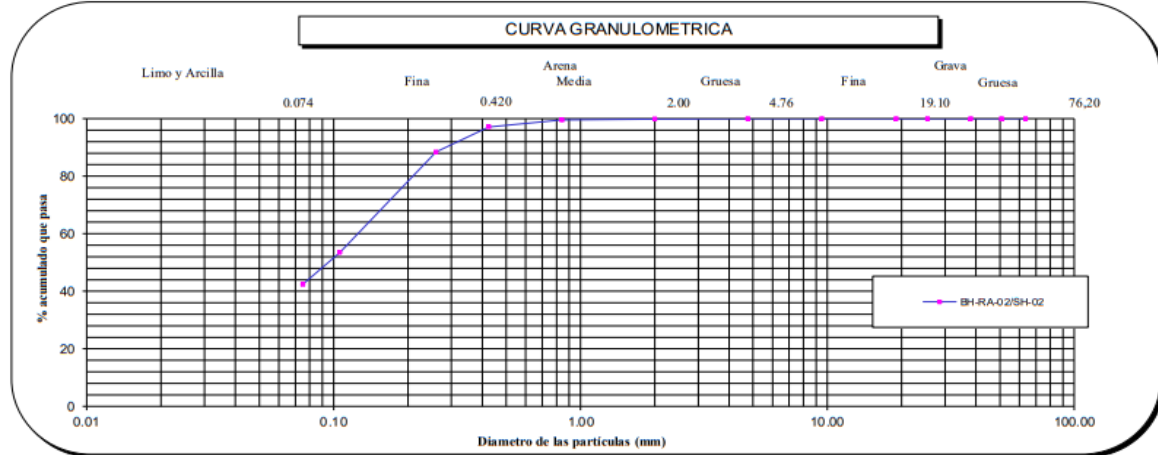
IDENTIFICACIÓN : BH-RA-02/SH-02	PRESENTACIÓN : 01 Costal de polietileno
PROFUNDIDAD (m) : 5.05	CANTIDAD : 5 kg aprox.

NTP 339.128 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	Malla		Peso retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa	CARACTERÍSTICAS GENERALES
	N°	Abertura (mm)					
	3"	76.200	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>ASTM D 2488 "Descripción e Identificación de suelos"</b> Grava (Ret N° 4) : 0.0 % Arena : 57.6 % Fino (Pas. N° 200) : 42.4 %  <b>NTP 339.127, "Contenido de Humedad"</b> Cont. De humedad : 11.33 %  <b>NTP 339.129 "Límites de Atterberg"</b> Limite Líquido (L.L.) : NP Limite Plástico (L.P.) : NP Índice Plástico (I.P.) : NP  <b>NTP 339.134, "Clasificación con propósito de ingeniería" (SUCS)</b> SM Arena limosa  <b>ASTM D 382, "Clasificación para el uso en vías de transporte" (AASHTO)</b> A-4 (1) Descripción (AASHTO) REG-MALO
	2 1/2"	63.500	0.0	0.0	0.0	100.0	
	2"	50.800	0.0	0.0	0.0	100.0	
	1 1/2"	38.100	0.0	0.0	0.0	100.0	
	1"	25.400	0.0	0.0	0.0	100.0	
	3/4"	19.000	0.0	0.0	0.0	100.0	
	3/8"	9.500	0.0	0.0	0.0	100.0	
	N° 4	4.760	0.0	0.0	0.0	100.0	
	N° 10	2.000	0.3	0.1	0.1	99.9	
	N° 20	0.840	0.9	0.4	0.5	99.5	
	N° 40	0.425	6.0	2.4	2.9	97.1	
	N° 60	0.260	22.1	8.7	11.6	88.4	
	N° 140	0.106	88.2	34.9	46.5	53.5	
	N° 200	0.075	28.0	11.1	57.6	42.4	
	- N° 200	ASTM D 1140	-	42.4	100.0	-	



**OBSERVACIONES:**  
- Muestra tomada e identificada por personal de laboratorio.  
- Ensayo efectuado al suelo natural.  
- El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.




Fecha de emisión : Lima, 07 de Diciembre del 2022

Tec.: T.G.A.  
Rev.: A.G.C.

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

Lima 07, Comas - Asociación Vivienda La Paz, Mz.A Lt.6,  
Celular : 949704705, 987524080

 Una empresa del Grupo Anddes	<b>LABORATORIO GEOTÉCNICO</b> <b>Análisis granulométrico por tamizado</b> <b>ASTM D 6913 / D6913M-17 (*)</b>		N° de informe <b>EPE-22.10.173</b>
			11-GEO-01-FOR-2000/ R0 / 08-12-22
Nombre del proyecto Estabilización Física de Relaveras Antiguas		N° de proyecto 19.10.07.07-80-CO-ITE-001	N° de muestra Shelby-01
Cliente NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	Ubicación del proyecto Unidad Minera Pucarrajo	Solicitado por Leonardo Salas	Fecha 07-02-2023
Código de muestra BH-RA-09	Profundidad (m) 9.00-9.60	Zona --	
Descripción --			

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado que pasa
3"	76,200	100
2"	50,000	100
1 1/2"	37,500	100
1"	25,000	100
3/4"	19,000	100
3/8"	9,500	100
N° 4	4,750	100
N° 10	2,000	100
N° 20	0,850	99
N° 40	0,425	97
N° 60	0,250	94
N° 100	0,150	90
N° 140	0,106	87
N° 200	0,075	85

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	0
Arena (%)	15
Limos y arcillas (%)	85

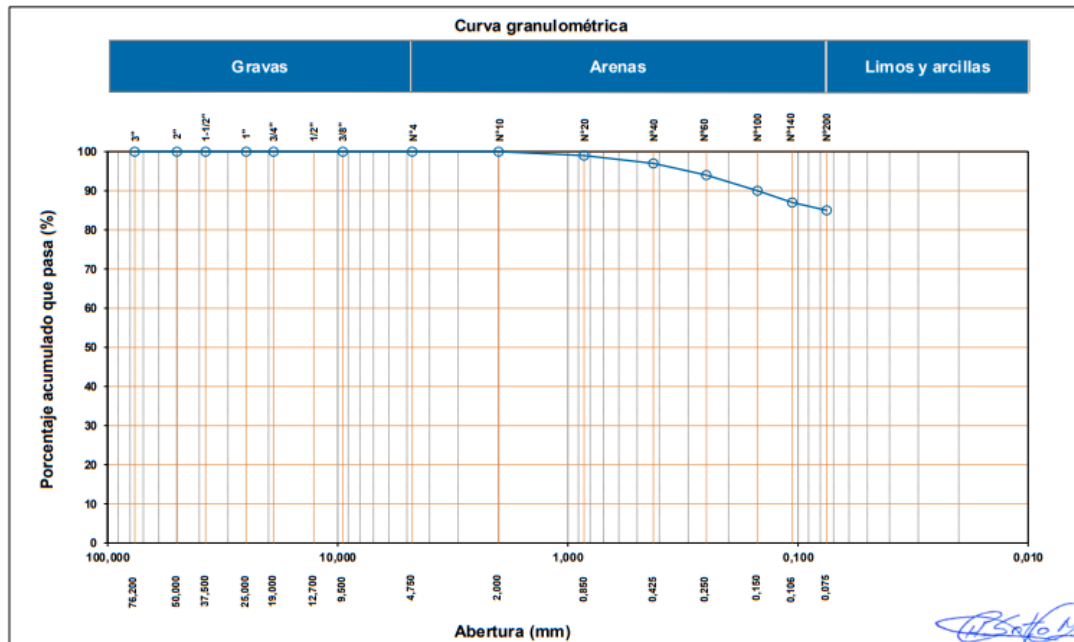
D <sub>10</sub>	
D <sub>30</sub>	
D <sub>60</sub>	
Cu	
Cc	

Límites de Atterberg	
LL (%)	18
LP (%)	NP
IP (%)	NP

Humedad (%)	18,8
-------------	------

SUCS	ML
------	----

Limo de baja plasticidad con arena
------------------------------------



  
 Carlos H. Soto Morote  
 Gerente Lab. Geotécnico  
 CIP. 87545


**Observaciones**

Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

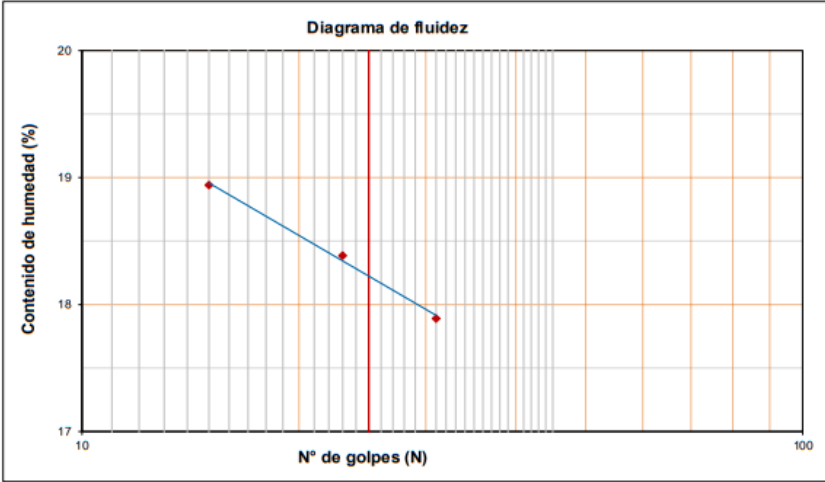
\*: No se considera la cantidad de material mínima para muestras representativas de tamaños máximos de partículas de 2" y 3"

Realizado por: TBP	Ingresado por: JGF	Revisado por: CSM
-----------------------	-----------------------	----------------------

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

 <p>Una empresa del Grupo Anddes</p>		<p align="center"><b>LABORATORIO GEOTÉCNICO</b> Límites de Atterberg ASTM D4318-17e1</p>		<p align="right">N° de informe <b>EPE-22.10.173</b></p>
<p align="center">SIG AND</p>		<p align="right">11-GED-01-FOR-2002 / R0 / 08-12-22</p>		
Nombre del proyecto		Estabilización Física de Relaveras Antiguas		
Cliente	NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	N° de proyecto	19.10.07.07-80-CO-ITE-001	
Ubicación del proyecto	Unidad Minera Pucarrajo	N° de muestra	Shelby-01	
Código de muestra	BH-RA-09	Solicitado por	Leonardo Salas	
Profundidad (m)	9.00-9.60	Fecha	07-02-2023	
Zona	--			
Descripción	--			

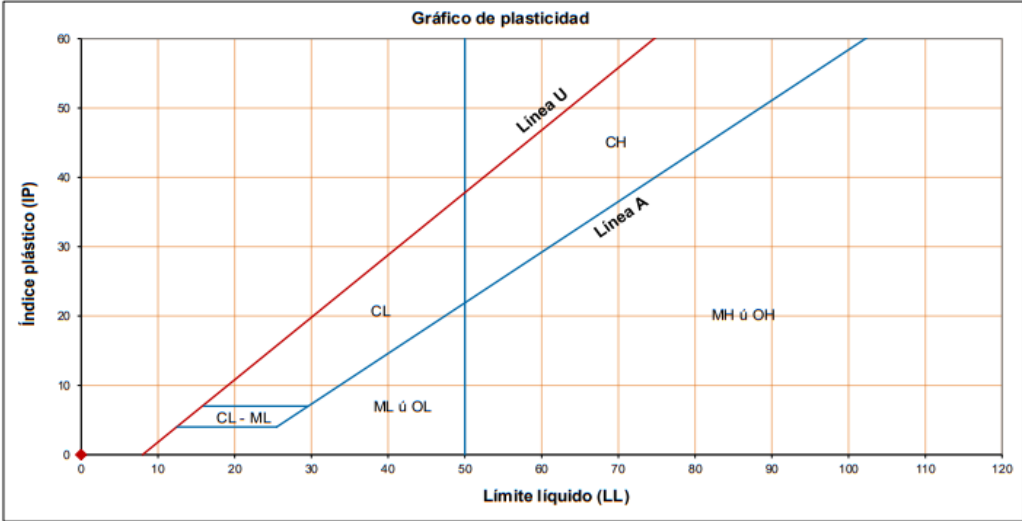


**Diagrama de fluidez**


**Límites de Atterberg**

LL(%)	18
LP(%)	NP
IP(%)	NP



**Gráfico de plasticidad**

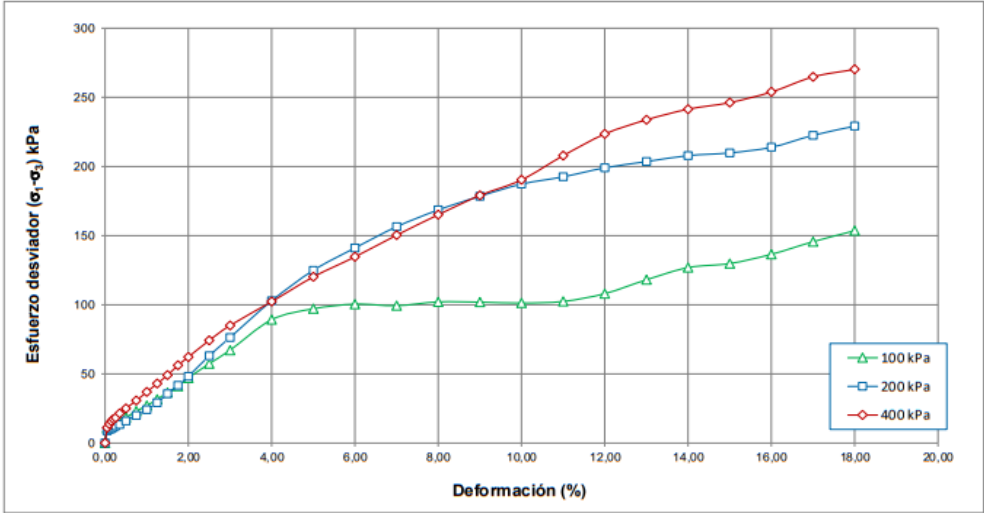
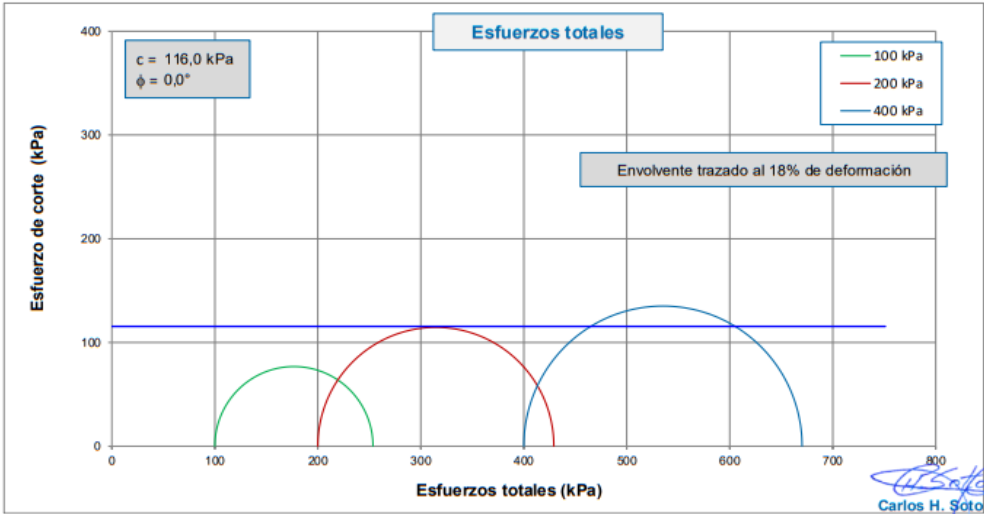
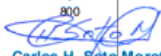


Carlos H. Soto Morote  
Gerente Lab. Geotécnico  
CIP. 87545


  


<b>Observaciones</b>		
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.		
Realizado por:	Ingresado por:	Revisado por:
MRM	JGF	CSM

Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.

Anddes Geolab SAC <small>Una empresa del Grupo Anddes</small>		LABORATORIO GEOTÉCNICO Compresión triaxial no consolidado - no drenado (UU) ASTM D2850-15		N° de informe EPE-22.10.173	
SIG AND				60-AND-60-FOR-2103 / R9 / 10-01-22	
Nombre del proyecto		Estabilización Física de Relaveras Antiguas			
Cliente	NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	N° de proyecto	19.10.07.07-80-CO-ITE-001		
Ubicación del proyecto	Unidad Minera Pucarrajo	N° de muestra	Shelby-01		
Código de muestra	BH-RA-09	Solicitado por	Leonardo Salas		
Profundidad (m)	9.00-9.60	Fecha	07-02-2023		
Zona	-				
Descripción	-				
<p>Estado: Muestra de tubo Shelby</p> <p>SUCS: --</p>   <p style="text-align: right;">   <b>Carlos H. Soto Morote</b>  Gerente Lab. Geotécnico  CIP. 87545 </p>					
<b>Observaciones</b>					
Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.					
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.					
La clasificación SUCS corresponde para TM=3*					
Grado de compactación:    Bajo <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Elevado <input type="checkbox"/>					
Realizado por: EHP		Ingresado por: JGF		Revisado por: CSM	
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.					



Anddes Geolab SAC <small>Una empresa del Grupo Anddes</small>		LABORATORIO GEOTÉCNICO Compresión triaxial no consolidado - no drenado (UU) ASTM D2850-15		N° de informe EPE-22.10.173 60-AND-60-FOR-2103 / R0 / 10-01-22																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Nombre del proyecto		Estabilización Física de Relaveras Antiguas																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Cliente	NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	N° de proyecto	19.10.07.07-80-CO-ITE-001																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ubicación del proyecto	Unidad Minera Pucarrajo	N° de muestra	Shelby-01																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Código de muestra	BH-RA-09	Solicitado por	Leonardo Salas																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Profundidad (m)	9.00-9.60	Fecha	07-02-2023																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Zona	--																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Descripción	--																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Estado: Muestra de tubo Shelby																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
SUCS		Esf. efect. inicial																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
--		200 kPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Asentamiento inmediato			Descripción																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	Inicio	Final		Valor																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Altura (cm)	10,83	10,83	Parámetro "B"	NA																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Diámetro (cm)	4,96	4,96	Velocidad (cm/min)	0,050																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Humedad (%)	16,76	16,28	Presión de celda (kPa)	200																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,293	2,293	Contra presión (kPa)	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Deform. (%)</th> <th>Fuerza (kN)</th> <th><math>\sigma_{\text{assv}}</math> (kPa)</th> <th>p (kPa)</th> <th>q (kPa)</th> <th><math>\sigma_1</math> (kPa)</th> <th><math>\sigma_3</math> (kPa)</th> <th>q/p</th> <th><math>(\sigma_1/\sigma_3)</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,00</td><td>0,000</td><td>0,0</td><td>200,0</td><td>0,0</td><td>200,0</td><td>200,0</td><td>0,00</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>0,017</td><td>8,8</td><td>204,4</td><td>4,4</td><td>208,8</td><td>200,0</td><td>0,02</td><td>1,04</td></tr> <tr><td>0,10</td><td>0,019</td><td>9,8</td><td>204,9</td><td>4,9</td><td>209,8</td><td>200,0</td><td>0,02</td><td>1,05</td></tr> <tr><td>0,15</td><td>0,020</td><td>10,3</td><td>205,2</td><td>5,2</td><td>210,3</td><td>200,0</td><td>0,03</td><td>1,05</td></tr> <tr><td>0,20</td><td>0,022</td><td>11,4</td><td>205,7</td><td>5,7</td><td>211,4</td><td>200,0</td><td>0,03</td><td>1,06</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>0,024</td><td>12,4</td><td>206,2</td><td>6,2</td><td>212,4</td><td>200,0</td><td>0,03</td><td>1,06</td></tr> <tr><td>0,35</td><td>0,026</td><td>13,4</td><td>206,7</td><td>6,7</td><td>213,4</td><td>200,0</td><td>0,03</td><td>1,07</td></tr> <tr><td>0,50</td><td>0,031</td><td>16,0</td><td>208,0</td><td>8,0</td><td>216,0</td><td>200,0</td><td>0,04</td><td>1,08</td></tr> <tr><td>0,75</td><td>0,039</td><td>20,0</td><td>210,0</td><td>10,0</td><td>220,0</td><td>200,0</td><td>0,05</td><td>1,10</td></tr> <tr><td>1,00</td><td>0,047</td><td>24,1</td><td>212,0</td><td>12,0</td><td>224,1</td><td>200,0</td><td>0,06</td><td>1,12</td></tr> <tr><td>1,25</td><td>0,057</td><td>29,1</td><td>214,6</td><td>14,6</td><td>229,1</td><td>200,0</td><td>0,07</td><td>1,15</td></tr> <tr><td>1,50</td><td>0,070</td><td>35,7</td><td>217,8</td><td>17,8</td><td>235,7</td><td>200,0</td><td>0,08</td><td>1,18</td></tr> <tr><td>1,75</td><td>0,082</td><td>41,7</td><td>220,8</td><td>20,8</td><td>241,7</td><td>200,0</td><td>0,09</td><td>1,21</td></tr> <tr><td>2,00</td><td>0,095</td><td>48,2</td><td>224,1</td><td>24,1</td><td>248,2</td><td>200,0</td><td>0,11</td><td>1,24</td></tr> <tr><td>2,50</td><td>0,125</td><td>63,1</td><td>231,5</td><td>31,5</td><td>263,1</td><td>200,0</td><td>0,14</td><td>1,32</td></tr> <tr><td>3,00</td><td>0,152</td><td>76,3</td><td>238,2</td><td>38,2</td><td>276,3</td><td>200,0</td><td>0,16</td><td>1,38</td></tr> <tr><td>4,00</td><td>0,207</td><td>102,8</td><td>251,4</td><td>51,4</td><td>302,8</td><td>200,0</td><td>0,20</td><td>1,51</td></tr> <tr><td>5,00</td><td>0,254</td><td>124,9</td><td>262,4</td><td>62,4</td><td>324,9</td><td>200,0</td><td>0,24</td><td>1,62</td></tr> <tr><td>6,00</td><td>0,290</td><td>141,1</td><td>270,5</td><td>70,5</td><td>341,1</td><td>200,0</td><td>0,26</td><td>1,71</td></tr> <tr><td>7,00</td><td>0,325</td><td>156,4</td><td>278,2</td><td>78,2</td><td>356,4</td><td>200,0</td><td>0,28</td><td>1,78</td></tr> <tr><td>8,00</td><td>0,354</td><td>168,6</td><td>284,3</td><td>84,3</td><td>368,6</td><td>200,0</td><td>0,30</td><td>1,84</td></tr> <tr><td>9,00</td><td>0,379</td><td>178,5</td><td>289,2</td><td>89,2</td><td>378,5</td><td>200,0</td><td>0,31</td><td>1,89</td></tr> <tr><td>10,00</td><td>0,402</td><td>187,2</td><td>293,6</td><td>93,6</td><td>387,2</td><td>200,0</td><td>0,32</td><td>1,94</td></tr> <tr><td>11,00</td><td>0,418</td><td>192,5</td><td>296,3</td><td>96,3</td><td>392,5</td><td>200,0</td><td>0,32</td><td>1,96</td></tr> <tr><td>12,00</td><td>0,437</td><td>199,0</td><td>299,5</td><td>99,5</td><td>399,0</td><td>200,0</td><td>0,33</td><td>2,00</td></tr> <tr><td>13,00</td><td>0,452</td><td>203,5</td><td>301,8</td><td>101,8</td><td>403,5</td><td>200,0</td><td>0,34</td><td>2,02</td></tr> <tr><td>14,00</td><td>0,467</td><td>207,9</td><td>303,9</td><td>103,9</td><td>407,9</td><td>200,0</td><td>0,34</td><td>2,04</td></tr> <tr><td>15,00</td><td>0,477</td><td>209,8</td><td>304,9</td><td>104,9</td><td>409,8</td><td>200,0</td><td>0,34</td><td>2,05</td></tr> <tr><td>16,00</td><td>0,492</td><td>213,9</td><td>306,9</td><td>106,9</td><td>413,9</td><td>200,0</td><td>0,35</td><td>2,07</td></tr> <tr><td>17,00</td><td>0,518</td><td>222,5</td><td>311,3</td><td>111,3</td><td>422,5</td><td>200,0</td><td>0,36</td><td>2,11</td></tr> <tr><td>18,00</td><td>0,540</td><td>229,2</td><td>314,6</td><td>114,6</td><td>429,2</td><td>200,0</td><td>0,36</td><td>2,15</td></tr> </tbody> </table>						Deform. (%)	Fuerza (kN)	$\sigma_{\text{assv}}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)	q/p	$(\sigma_1/\sigma_3)$	0,00	0,000	0,0	200,0	0,0	200,0	200,0	0,00	1,00	0,05	0,017	8,8	204,4	4,4	208,8	200,0	0,02	1,04	0,10	0,019	9,8	204,9	4,9	209,8	200,0	0,02	1,05	0,15	0,020	10,3	205,2	5,2	210,3	200,0	0,03	1,05	0,20	0,022	11,4	205,7	5,7	211,4	200,0	0,03	1,06	0,25	0,024	12,4	206,2	6,2	212,4	200,0	0,03	1,06	0,35	0,026	13,4	206,7	6,7	213,4	200,0	0,03	1,07	0,50	0,031	16,0	208,0	8,0	216,0	200,0	0,04	1,08	0,75	0,039	20,0	210,0	10,0	220,0	200,0	0,05	1,10	1,00	0,047	24,1	212,0	12,0	224,1	200,0	0,06	1,12	1,25	0,057	29,1	214,6	14,6	229,1	200,0	0,07	1,15	1,50	0,070	35,7	217,8	17,8	235,7	200,0	0,08	1,18	1,75	0,082	41,7	220,8	20,8	241,7	200,0	0,09	1,21	2,00	0,095	48,2	224,1	24,1	248,2	200,0	0,11	1,24	2,50	0,125	63,1	231,5	31,5	263,1	200,0	0,14	1,32	3,00	0,152	76,3	238,2	38,2	276,3	200,0	0,16	1,38	4,00	0,207	102,8	251,4	51,4	302,8	200,0	0,20	1,51	5,00	0,254	124,9	262,4	62,4	324,9	200,0	0,24	1,62	6,00	0,290	141,1	270,5	70,5	341,1	200,0	0,26	1,71	7,00	0,325	156,4	278,2	78,2	356,4	200,0	0,28	1,78	8,00	0,354	168,6	284,3	84,3	368,6	200,0	0,30	1,84	9,00	0,379	178,5	289,2	89,2	378,5	200,0	0,31	1,89	10,00	0,402	187,2	293,6	93,6	387,2	200,0	0,32	1,94	11,00	0,418	192,5	296,3	96,3	392,5	200,0	0,32	1,96	12,00	0,437	199,0	299,5	99,5	399,0	200,0	0,33	2,00	13,00	0,452	203,5	301,8	101,8	403,5	200,0	0,34	2,02	14,00	0,467	207,9	303,9	103,9	407,9	200,0	0,34	2,04	15,00	0,477	209,8	304,9	104,9	409,8	200,0	0,34	2,05	16,00	0,492	213,9	306,9	106,9	413,9	200,0	0,35	2,07	17,00	0,518	222,5	311,3	111,3	422,5	200,0	0,36	2,11	18,00	0,540	229,2	314,6	114,6	429,2	200,0	0,36	2,15
Deform. (%)	Fuerza (kN)	$\sigma_{\text{assv}}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)	q/p	$(\sigma_1/\sigma_3)$																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,00	0,000	0,0	200,0	0,0	200,0	200,0	0,00	1,00																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,05	0,017	8,8	204,4	4,4	208,8	200,0	0,02	1,04																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,10	0,019	9,8	204,9	4,9	209,8	200,0	0,02	1,05																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,15	0,020	10,3	205,2	5,2	210,3	200,0	0,03	1,05																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,20	0,022	11,4	205,7	5,7	211,4	200,0	0,03	1,06																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,25	0,024	12,4	206,2	6,2	212,4	200,0	0,03	1,06																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,35	0,026	13,4	206,7	6,7	213,4	200,0	0,03	1,07																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,50	0,031	16,0	208,0	8,0	216,0	200,0	0,04	1,08																																																																																																																																																																																																																																																																																													
0,75	0,039	20,0	210,0	10,0	220,0	200,0	0,05	1,10																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1,00	0,047	24,1	212,0	12,0	224,1	200,0	0,06	1,12																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1,25	0,057	29,1	214,6	14,6	229,1	200,0	0,07	1,15																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1,50	0,070	35,7	217,8	17,8	235,7	200,0	0,08	1,18																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1,75	0,082	41,7	220,8	20,8	241,7	200,0	0,09	1,21																																																																																																																																																																																																																																																																																													
2,00	0,095	48,2	224,1	24,1	248,2	200,0	0,11	1,24																																																																																																																																																																																																																																																																																													
2,50	0,125	63,1	231,5	31,5	263,1	200,0	0,14	1,32																																																																																																																																																																																																																																																																																													
3,00	0,152	76,3	238,2	38,2	276,3	200,0	0,16	1,38																																																																																																																																																																																																																																																																																													
4,00	0,207	102,8	251,4	51,4	302,8	200,0	0,20	1,51																																																																																																																																																																																																																																																																																													
5,00	0,254	124,9	262,4	62,4	324,9	200,0	0,24	1,62																																																																																																																																																																																																																																																																																													
6,00	0,290	141,1	270,5	70,5	341,1	200,0	0,26	1,71																																																																																																																																																																																																																																																																																													
7,00	0,325	156,4	278,2	78,2	356,4	200,0	0,28	1,78																																																																																																																																																																																																																																																																																													
8,00	0,354	168,6	284,3	84,3	368,6	200,0	0,30	1,84																																																																																																																																																																																																																																																																																													
9,00	0,379	178,5	289,2	89,2	378,5	200,0	0,31	1,89																																																																																																																																																																																																																																																																																													
10,00	0,402	187,2	293,6	93,6	387,2	200,0	0,32	1,94																																																																																																																																																																																																																																																																																													
11,00	0,418	192,5	296,3	96,3	392,5	200,0	0,32	1,96																																																																																																																																																																																																																																																																																													
12,00	0,437	199,0	299,5	99,5	399,0	200,0	0,33	2,00																																																																																																																																																																																																																																																																																													
13,00	0,452	203,5	301,8	101,8	403,5	200,0	0,34	2,02																																																																																																																																																																																																																																																																																													
14,00	0,467	207,9	303,9	103,9	407,9	200,0	0,34	2,04																																																																																																																																																																																																																																																																																													
15,00	0,477	209,8	304,9	104,9	409,8	200,0	0,34	2,05																																																																																																																																																																																																																																																																																													
16,00	0,492	213,9	306,9	106,9	413,9	200,0	0,35	2,07																																																																																																																																																																																																																																																																																													
17,00	0,518	222,5	311,3	111,3	422,5	200,0	0,36	2,11																																																																																																																																																																																																																																																																																													
18,00	0,540	229,2	314,6	114,6	429,2	200,0	0,36	2,15																																																																																																																																																																																																																																																																																													
 Carlos H. Soto Morote Gerente Lab. Geotécnico CIP. 87545																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Observaciones																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
La clasificación SUCS corresponde para TM=3"																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Grado de compactación: <input type="checkbox"/> Bajo <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Elevado <input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Realizado por: EHP		Ingresado por: JGF		Revisado por: CSM																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

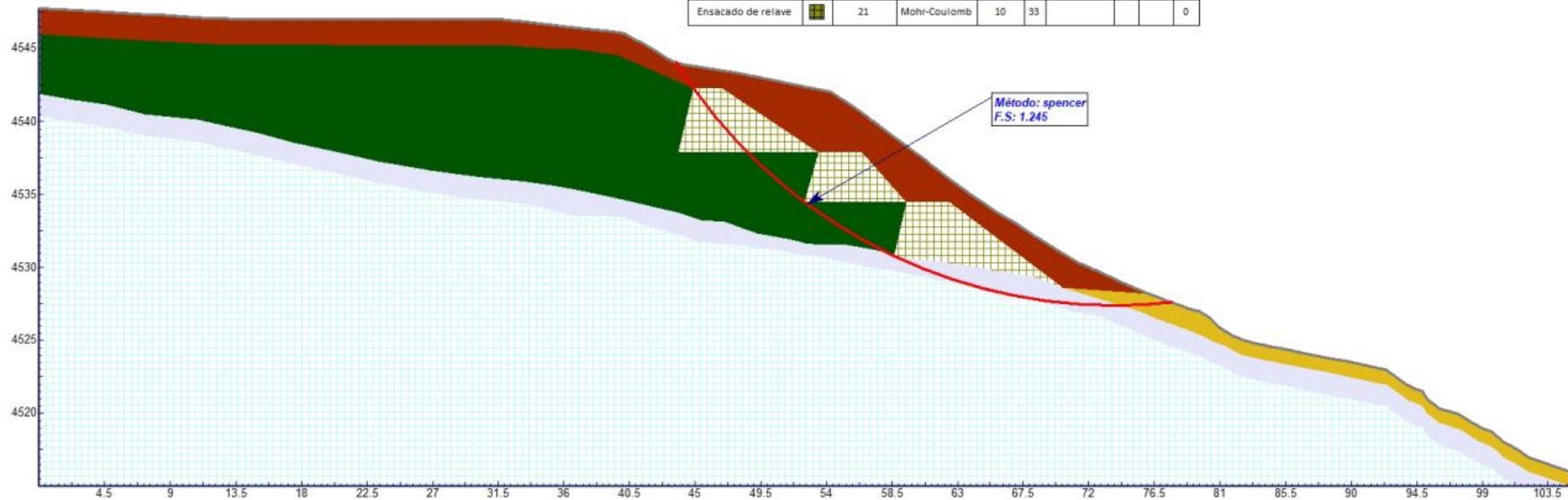
Anddes Geolab SAC <small>Una empresa del Grupo Anddes</small>		LABORATORIO GEOTÉCNICO Compresión triaxial no consolidado - no drenado (UU) ASTM D2850-15		N° de informe EPE-22.10.173 <small>60-AND-60-F OR-2103 / R0 / 10-01-22</small>				
Nombre del proyecto		Estabilización Física de Relaveras Antiguas		SIG AND				
Cliente	NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	N° de proyecto	19.10.07.07-80-CO-ITE-001					
Ubicación del proyecto	Unidad Minera Pucarrajo	N° de muestra	Shelby-01					
Código de muestra	BH-RA-09	Solicitado por	Leonardo Salas					
Profundidad (m)	9.00-9.60	Fecha	07-02-2023					
Zona	-							
Descripción	-							
Estado: Muestra de tubo Shelby								
SUCS		Esf. efect. inicial						
--		100 kPa						
Asentamiento inmediato			Descripción					
	Inicio	Final		Valor				
Altura (cm)	10,87	10,87	Parámetro "B"	NA				
Diámetro (cm)	4,97	4,97	Velocidad (cm/min)	0,050				
Humedad (%)	18,44	18,10	Presión de celda (kPa)	100				
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,239	2,239	Contra presión (kPa)	0				
Deform. (%)	Fuerza (kN)	$\sigma_{1inv}$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)	q/p	$(\sigma_1/\sigma_3)$
0,00	0,000	0,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,00	1,00
0,05	0,021	10,8	105,4	5,4	110,8	100,0	0,05	1,11
0,10	0,023	11,9	105,9	5,9	111,9	100,0	0,06	1,12
0,15	0,025	12,9	106,4	6,4	112,9	100,0	0,06	1,13
0,20	0,026	13,4	106,7	6,7	113,4	100,0	0,06	1,13
0,25	0,028	14,4	107,2	7,2	114,4	100,0	0,07	1,14
0,35	0,031	15,9	108,0	8,0	115,9	100,0	0,07	1,16
0,50	0,036	18,5	109,2	9,2	118,5	100,0	0,08	1,18
0,75	0,045	23,1	111,5	11,5	123,1	100,0	0,10	1,23
1,00	0,053	27,1	113,5	13,5	127,1	100,0	0,12	1,27
1,25	0,062	31,6	115,8	15,8	131,6	100,0	0,14	1,32
1,50	0,072	36,6	118,3	18,3	136,6	100,0	0,15	1,37
1,75	0,081	41,1	120,5	20,5	141,1	100,0	0,17	1,41
2,00	0,093	47,1	123,5	23,5	147,1	100,0	0,19	1,47
2,50	0,114	57,4	128,7	28,7	157,4	100,0	0,22	1,57
3,00	0,134	67,1	133,6	33,6	167,1	100,0	0,25	1,67
4,00	0,180	89,2	144,6	44,6	189,2	100,0	0,31	1,89
5,00	0,198	97,1	148,5	48,5	197,1	100,0	0,33	1,97
6,00	0,207	100,4	150,2	50,2	200,4	100,0	0,33	2,00
7,00	0,207	99,4	149,7	49,7	199,4	100,0	0,33	1,99
8,00	0,215	102,1	151,0	51,0	202,1	100,0	0,34	2,02
9,00	0,217	101,9	151,0	51,0	201,9	100,0	0,34	2,02
10,00	0,218	101,3	150,6	50,6	201,3	100,0	0,34	2,01
11,00	0,223	102,4	151,2	51,2	202,4	100,0	0,34	2,02
12,00	0,238	108,1	154,0	54,0	208,1	100,0	0,35	2,08
13,00	0,263	118,1	159,0	59,0	218,1	100,0	0,37	2,18
14,00	0,286	126,9	163,5	63,5	226,9	100,0	0,39	2,27
15,00	0,296	129,8	164,9	64,9	229,8	100,0	0,39	2,30
16,00	0,315	136,5	168,3	68,3	236,5	100,0	0,41	2,37
17,00	0,340	145,6	172,8	72,8	245,6	100,0	0,42	2,46
18,00	0,363	153,6	176,8	76,8	253,6	100,0	0,43	2,54
 Carlos H. Soto Morote Gerente Lab. Geotécnico CIP. 87545								
<b>Observaciones</b>								
Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.								
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.								
La clasificación SUCS corresponde para TM=3"								
<b>Grado de compactación:</b> Bajo <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Elevado <input type="checkbox"/>								
Realizado por: EHP			Ingresado por: JGF			Revisado por: CSM		
Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.								

 <p>Una empresa del Grupo Anddes</p>		<b>LABORATORIO GEOTÉCNICO</b> <b>Compresión triaxial no consolidado - no drenado (UU)</b> <b>ASTM D2850-15</b>		N° de informe <b>EPE-22.10.173</b>			
SIG AND		60-AND-60-FOR-2103 / R0 / 10-01-22					
Nombre del proyecto		Estabilización Física de Relaveras Antiguas					
Cliente	NYRTAR ANCASH SA - COINGEC SAC	N° de proyecto	19.10.07.07-80-CO-ITE-001				
Ubicación del proyecto	Unidad Minera Pucarrajo	N° de muestra	Shelby-01				
Código de muestra	BH-RA-09	Solicitado por	Leonardo Salas				
Profundidad (m)	9.00-9.60	Fecha	07-02-2023				
Zona	--						
Descripción	--						
<b>Estado: Muestra de tubo Shelby</b>							
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>SUCS</td> <td>--</td> </tr> </table>						SUCS	--
SUCS	--						
Panel fotográfico							
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>EPE-22.10.173 Item: 3 Carga:100 kPa UU 2.0"</p> <p><b>Especimen 100 kPa</b></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>EPE-22.10.173 Item: 3 Carga:200 kPa UU 2.0"</p> <p><b>Especimen 200 kPa</b></p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>EPE-22.10.173 Item: 3 Carga:400 kPa UU 2.0"</p> <p><b>Especimen 400 kPa</b></p> </div> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">           Carlos H. Soto Morote          Gerente Lab. Geotécnico          CIP. 87545       </div>							
<b>Observaciones</b>							
Los parámetros de resistencia cortante reportados podrían ser reinterpretados en caso ser considerado pertinente por un profesional competente en geotecnia.							
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.							
La clasificación SUCS corresponde para TM=3"							
<b>Grado de compactación:</b> Bajo <input type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Elevado <input type="checkbox"/>							
Realizado por: EHP		Ingresado por: JGF		Revisado por: CSM			
<small>Estos datos se aplican solo a las muestras ensayadas. Los datos e información contenidos en esta hoja no pueden ser utilizados sin la autorización de Anddes Geolab SAC. Con la aceptación de los datos y resultados presentados en esta página, el cliente está de acuerdo en limitar la responsabilidad de Anddes Geolab SAC de cualquier reclamo que provenga del cliente y otras partes por el uso de estos datos. Este informe no es válido sin la firma y sello del jefe del laboratorio.</small>							

ANEXO N°7: Análisis de estabilidad

**Análisis de Estabilidad – Relavera Antiguas – Condición Actual**  
Sección Geotécnica 1-1' - Falla circular local - Análisis estático - FS = 1.245

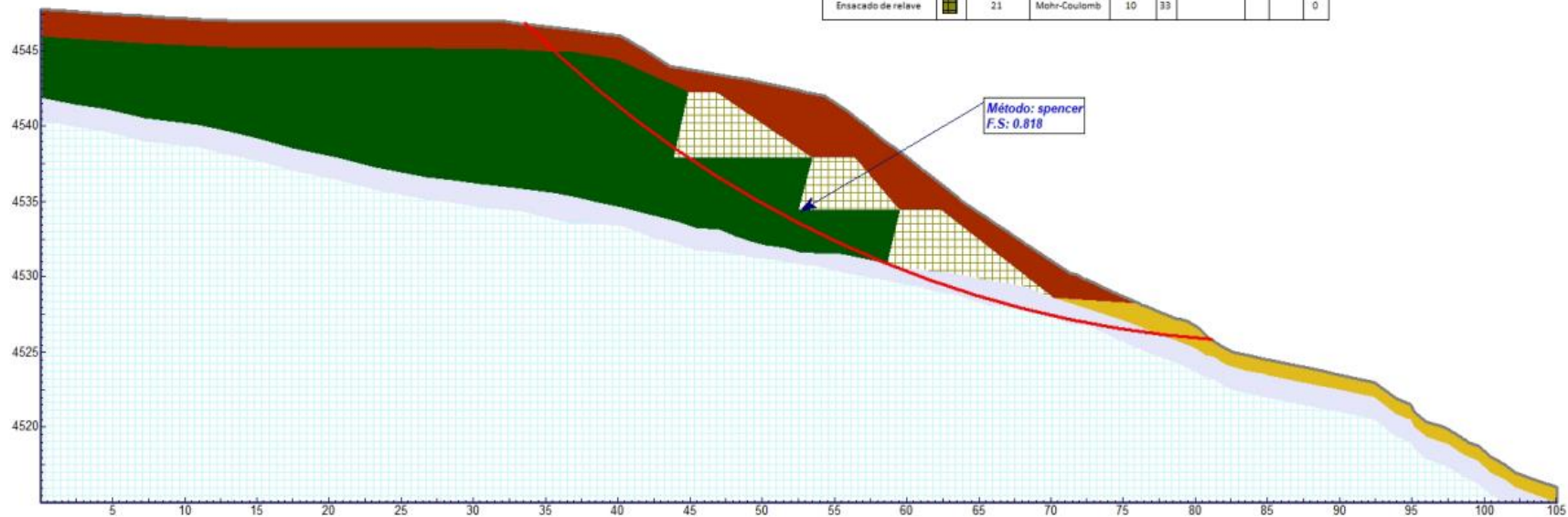
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	UCS (kN/m <sup>2</sup> )	m	s	Ru
Relleno no controlado	■	21	Mohr-Coulomb	0	34				0.1
Relave UU	■	20	Mohr-Coulomb	39	17				0.15
Depósito coluvial	■	20	Mohr-Coulomb	0	34				0
Suelo residual	■	19	Mohr-Coulomb	5	28				0.1
Roca caliza	■	23	Hoek-Brown			35000	0.94	0.001	0
Ensayado de relave	■	21	Mohr-Coulomb	10	33				0



**Análisis de Estabilidad – Relavera Antiguas – Condición Actual**  
Sección Geotécnica 1-1' - Falla circular local - Análisis pseudoestático (Tr = 500 años) - **FS = 0.818**

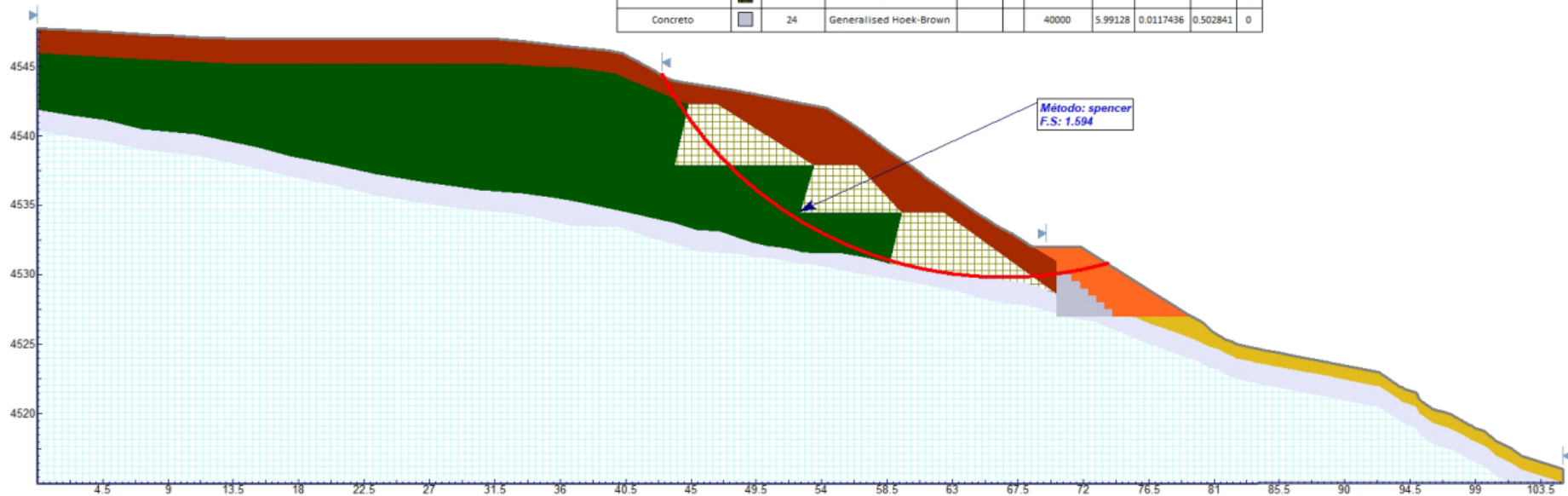
0.164

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	UCS (kN/m <sup>2</sup> )	m	s	Ru
Relleno no controlado	■	21	Mohr-Coulomb	0	34				0.1
Relave CU	■	20	Mohr-Coulomb	0	32				0.15
Depósito coluvial	■	20	Mohr-Coulomb	0	34				0
Suelo residual	■	19	Mohr-Coulomb	5	28				0.1
Roca caliza	■	23	Hoek-Brown			35000	0.94	0.001	0
Ensayado de relave	■	21	Mohr-Coulomb	10	33				0



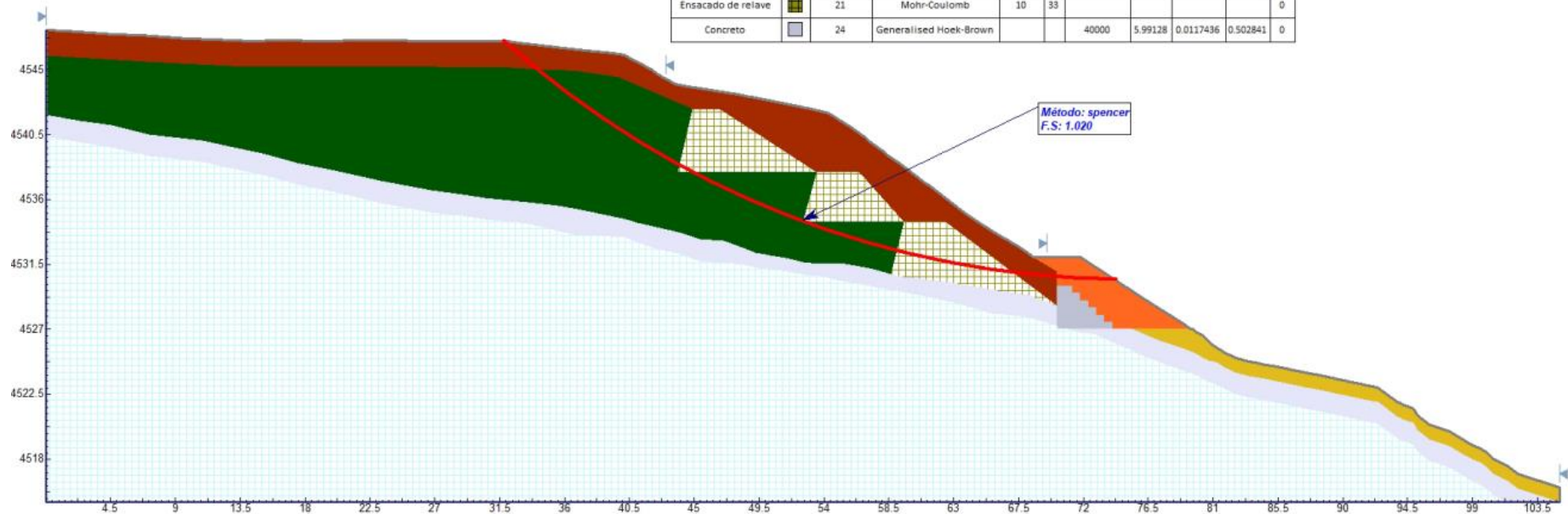
**Análisis de Estabilidad – Relavera Antiguas – Condición de Cierre**  
**Sección Geotécnica 1-1' - Falla circular local - Análisis estático - FS = 1.594**

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	UCS (kN/m <sup>2</sup> )	m	s	a	Ru
Relleno no controlado	■	21	Mohr-Coulomb	0	34					0.1
Relave UU	■	20	Mohr-Coulomb	39	17					0.15
Depósito coluvial	■	20	Mohr-Coulomb	0	34					0
Suelo residual	■	19	Mohr-Coulomb	5	28					0.1
Relleno estructural	■	22	Mohr-Coulomb	0	36					0
Roca caliza	■	23	Hoek-Brown			35000	0.94	0.001		0
Ensacado de relave	■	21	Mohr-Coulomb	10	33					0
Concreto	■	24	Generalised Hoek-Brown			40000	5.99128	0.0117436	0.502841	0



**Análisis de Estabilidad – Relavera Antiguas – Condición de Cierre**  
Sección Geotécnica 1-1' - Falla circular local - Análisis pseudoestático (Tr = 500 años) - FS = 1.020

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	UCS (kN/m <sup>2</sup> )	m	s	a	Ru
Relleno no controlado	■	21	Mohr-Coulomb	0	34					0.1
Relave CU	■	20	Mohr-Coulomb	0	32					0.15
Depósito coluvial	■	20	Mohr-Coulomb	0	34					0
Suelo residual	■	19	Mohr-Coulomb	5	28					0.1
Relleno estructural	■	22	Mohr-Coulomb	0	36					0
Roca caliza	■	23	Hoek-Brown			35000	0.94	0.001		0
Ensayado de relave	■	21	Mohr-Coulomb	10	33					0
Concreto	■	24	Generalised Hoek-Brown			40000	5.99128	0.0117436	0.502841	0



ANEXO N°8: Plano de geología e investigaciones geotécnicas

