

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Evaluación de la resistencia de relleno cementado
para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios,
Unidad Minera Cerro Lindo**

Erick Manuel Galvan Maldonado
Ronald Freddy Matias Ayma

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Ing. Julio Fredy Porras Mayta

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a la universidad Continental, a toda la facultad de Ingeniería de Minas, a nuestros profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que podamos crecer día a día como profesionales.

Finalmente queremos expresar nuestro más grande y sincero agradecimiento al Ing. Julio Porras Mayta, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios, por ser inspirador y brindarnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes logramos llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ASESOR	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	IVIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUCCIÓN	XIII
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1. Problema general	16
1.1.2. Problemas específicos.....	16
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo general.....	16
1.2.2. Objetivos específicos	16
1.3. Justificación e importancia	17
1.3.1. Justificación práctica.....	17
1.3.2. Justificación metodológica	17
1.4. Hipótesis y descripción de variables	17
1.4.1. Hipótesis general	17
1.4.2. Hipótesis específicas	17
1.4.3. Variables.....	18
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Antecedentes del problema	19
2.2. Bases teóricas	22
2.2.1. Relleno de mina.....	22
2.2.2. Relleno sin cemento	25
2.2.3. Relleno hidráulico	26
2.2.4. Relleno con cemento	27
2.3. Definición de términos básicos	32
CAPITULO III METODOLOGÍA.....	35

3.1. Métodos y alcances de la investigación	35
3.1.1. Método general	35
3.1.2. Tipo de investigación	35
3.1.3. Nivel de investigación	35
3.2. Diseño de la investigación	35
3.3. Población y muestra	36
3.3.1. Población	36
3.3.2. Muestra	36
3.4. Técnicas e instrumento de recolección de datos	36
3.4.1. Técnicas de recolección de datos	36
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	36
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información	37
4.2. Criterios de diseño	40
4.2.1. Investigaciones de campo y laboratorio	40
4.2.2. Investigaciones geotécnicas de campo	41
4.2.3. Excavación de calicatas con medición de densidad <i>insitu</i> y humedad ..	44
4.2.4. Ensayos de penetración SPT y cono de Peck	45
4.2.5. Correlación del Cono de Peck y SPT	46
4.2.6. Correlación de Angulo de fricción vs “N” de SPT	49
4.2.7. Correlación del valor de cohesión (c) vs “N” de SPT	51
4.2.8. Correlación entre la resistencia a la compresión no drenada (q_u) del relleno vs “N” de SPT	52
4.2.9. Análisis de resultados de ensayos de campo	53
4.2.10. Ensayos de laboratorio	59
4.2.11. Análisis de resultados de ensayos de laboratorio	64
4.3. Evaluación de la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas de relleno	68
4.3.1. Comparación de la resistencia obtenida en laboratorio de Cerro Lindo vs laboratorio Cismid	68
4.4. Revisión de base de datos de resistencia de relleno realizado por Cerro Lindo	72
4.4.1. Revisión de base de datos de granulometría del relave producido por Cerro Lindo	73

4.4.2. Back análisis de la estabilidad en tajeos fallados.....	74
4.5. Dimensionamiento de los tajeos secundarios, en base a la resistencia calibrada del relleno	77
4.5.1. Método de Mitchell (1982)	77
4.5.2. Método generalizado de Li (2014)	79
4.5.3. Criterios de diseño para el caso en estudio	84
4.5.4. Estimación de la resistencia de relleno para diferentes escenarios.....	85
4.6. Discusión de resultados	87
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
Anexos	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de diseño.....	40
Tabla 2. Periodos de fragua de las muestras ensayadas.....	40
Tabla 3. Relación de muestras extraídas en la campaña de trabajos de campo.....	43
Tabla 4. Características de las calicatas efectuadas.....	44
Tabla 5. Resumen de los ensayos de densidad Insitu efectuados.....	45
Tabla 6. Características de los ensayos SPT y Cono de Peck efectuados	46
Tabla 7. Resumen de las resistencias a la compresión no confinada qu obtenidas en los ensayos de compresión simple	60
Tabla 8. Resumen de resultados del ensayo triaxial UU	62
Tabla 9. Resumen de resultados del ensayo de corte directo.....	63
Tabla 10. Resumen de resultados del ensayo de permeabilidad	63
Tabla 11. Resumen del back análisis en fallas de taludes de relleno cementado.....	76
Tabla 12. Resistencia del relleno cementado requerido para una pared expuesta de 25 m de longitud y 30 m de altura	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de cemento (% volumen) vs resistencia compresiva uniaxial	28
Figura 2. Vista isométrica	41
Figura 3. Vista frontal	41
Figura 4. Ubicación de muestras inalteradas extraídas de los tajos rellenos	42
Figura 5. Comparación de resultados de SPT y Cono de Peck, se contabiliza número de golpes por cada 30 cm de penetración.....	47
Figura 6. Comparación de resultados de SPT y Cono de Peck, se contabiliza número de golpes por cada 30 cm de penetración.....	48
Figura 7. Correlación del ángulo de fricción insitu vs profundidad, para diferentes periodos de fraguado.	54
Figura 8. Valores promedio de ángulo de fricción insitu medido mediante ensayos SPT	55
Figura 9. Correlación de la cohesión vs profundidad para diferentes periodos de fraguado	55
Figura 10. Análisis de la cohesión medida mediante ensayos SPT	56
Figura 11. Correlación de la resistencia a la compresión no drenada vs profundidad, para diferentes periodos de fraguado	57
Figura 12. Análisis de la resistencia a la compresión no drenada medida mediante ensayos SPT.	57
Figura 13. Análisis de la variabilidad de la densidad del relleno con relación al tiempo de fraguado.....	58
Figura 14. Análisis de la variabilidad de la humedad del relleno con relación al tiempo de fraguado.....	59
Figura 15. Análisis de la variabilidad de la cohesión con respecto al tiempo ...	64
Figura 16. Análisis de la variabilidad del ángulo de fricción con respecto al tiempo.....	64
Figura 17. Estimación de la cohesión y ángulo de fricción del relleno global considerando los 5 tajeos analizados.....	65

Figura 18. Estimación de la cohesión y ángulo de fricción del relleno global considerando el muestreo de los tajeos analizados	66
Figura 19. Análisis de la variabilidad de la resistencia a la compresión unidireccional con respecto al tiempo, estimados en la zona superior del tajeo (rojo) y la ventana (azul)	67
Figura 20. Variabilidad de la resistencia en el tajo 950-OB2, en tres etapas de muestreo	69
Figura 21. Variabilidad de la resistencia en el tajo 016-OB5B, en 6 etapas de muestreo	69
Figura 22. Variabilidad de la resistencia en el tajo 014BN-OB5B, en 3 etapas de muestreo	70
Figura 23. Variabilidad de la resistencia en el tajo 750-OB6, en 5 etapas de muestreo	71
Figura 24. Variabilidad de la resistencia en el tajo 018-OB5, en 5 etapas de muestreo	72
Figura 25. Evolución de la resistencia del relleno vs el tiempo de fraguado	73
Figura 26. Evolución de la resistencia del relleno vs el tiempo de fraguado	73
Figura 27. Esquema típico de back análisis de estabilidad en fallas ocurridas en los taludes de relleno cementado	75
Figura 28. Falla por corte en el relleno (adaptado de Mine Backfill, Hassani & Archibald)	77
Figura 29. Perfil de la falla por corte en el relleno (adaptado de Mine Backfill, Hassani & Archibald)	78
Figura 30. Tajeo relleno con carga superficial en la parte superior del relleno (Li 2014)	80
Figura 31. Bloque de relleno considerando grietas de tensión (Li y Aubertin 2012)	83
Figura 32. Resistencia del relleno cementado requerido para una pared expuesta de 25 m de longitud y 30 m de altura	86

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se planteó resolver como problema general: ¿cuál es el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo - 2020?, y el objetivo general fue determinar el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo – 2020 y la hipótesis general a contrastar fue: el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado a través de la resistencia de la cohesión, fricción y factor de seguridad inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo – 2020.

El método general de investigación fue el científico de tipo aplicada de nivel explicativo, diseño experimental. La población estuvo conformada por cinco tajeos y la muestra censal conformada por cinco tajeos.

Producto de la investigación se concluye que los resultados de los parámetros de resistencia *insitu* del relleno cementado correlacionado a partir de los ensayos SPT, indican que el ángulo de fricción, resistencia a la cohesión y resistencia a la compresión simple; hay un leve incremento con respecto a la altura del tajeo y la resistencia vs. el tiempo de fraguado no muestra una homogeneidad. Asimismo, a partir de los 46 a 142 días de fraguado, la resistencia del relleno muestra un leve descenso.

Palabras claves: resistencia de relleno cementado, análisis de la estabilidad y tajeos secundarios.

ABSTRACT

The present research work was proposed to solve as a general problem: What is the result of the evaluation of the resistance of the cemented fill for the analysis of the stability of secondary pits, Cerro Lindo mining unit - 2020 ?, and the general objective was: Determine the result of the evaluation of the resistance of the cemented fill for the analysis of the stability of secondary pits, Cerro Lindo mining unit - 2020 and the general hypothesis to be tested was: The result of the evaluation of the resistance of the cemented fill through Cohesion resistance, friction and safety factor influence the analysis of the stability of secondary pits, Cerro Lindo mining unit - 2020.

The general research method was the applied scientific type of explanatory level, experimental design, the population was made up of The population is made up of 5 cuts and the census sample made up of 5 cuts.

As a result of the research, it is concluded that: The results of the in-situ resistance parameters of the cemented filling correlated from the SPT tests, indicate that the friction angle, resistance to cohesion and resistance to simple compression; there is a slight increase with respect to the height of the cut and the resistance vs. setting time does not show homogeneity. Likewise, from 46 to 142 days of setting, the strength of the filling shows a slight decrease.

Keywords: Strength of cemented fill, stability analysis and secondary pits.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación titulado: *Evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo*, partió de la problemática de Cerro Lindo, en donde se viene realizando el minado de tajeos secundarios en los diferentes cuerpos mineralizados, en esta, las paredes expuestas de los rellenos se muestran estables y en algunos casos inestables, considerando que estos tajeos fueron rellenos en diferentes periodos, se prevé una anomalía y degradación de su resistencia por efecto de los sulfuros y sulfatos.

Con la finalidad de conocer la resistencia *insitu* (real) del relleno y su sensibilidad (variación) en los diferentes tajeos, se han realizado trabajos de investigación geotécnica por métodos de ensayos de penetración estándar SPT y ensayo de penetración dinámica Cono de Peck CPT y extracción de muestras inalteradas.

Posteriormente, se ha realizado un programa de ensayos de laboratorio geotécnico en muestras extraídas de calicatas de 4 m de profundidad y ventanas de los tajeos, para determinar la densidad, humedad, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la compresión triaxial UU, ensayos de corte directo, granulometría y permeabilidad. Dichos ensayos y extracción de muestras se ejecutaron en 5 tajeos, los cuales fueron seleccionados en coordinación con Cerro Lindo.

Asimismo, se propone realizar el análisis de estabilidad de los tajeos expuestas al relleno con el objetivo de realizar la calibración de la resistencia y la estabilidad de futuras paredes de los tajeos.

Para el desarrollo de la investigación el trabajo se dividió en cuatro capítulos los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo I se detalla el planteamiento y formulación del problema dando a conocer el problema general y específico, del mismo modo se cita el objetivo

general y específico seguidamente de la justificación práctica y metodológica; para culminar este capítulo se exponen la hipótesis general, específica y las variables de esta investigación.

El capítulo II trata de los antecedentes nacionales e internacionales, así como de las bases teóricas y la definición de términos básicos de la investigación.

El capítulo III está destinado para la metodología de la investigación, donde se resalta el método general, tipo, nivel, diseño, población y muestra, así como las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En el capítulo IV corresponde a resultados y discusión en donde se exponen los datos que se obtuvieron de la investigación. Finalmente se dan a conocer las conclusiones recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Milpo S.A. es una empresa dedicada a la actividad minera que actualmente opera la unidad minera Cerro Lindo, el mismo que está ubicado en el distrito de Chavín, provincia de Chincha – Ica, al SE de Lima, a una altitud de 1820 m s. n. m., produce concentrados de zinc, cobre y plomo, la capacidad actual de procesamiento es de 18 000 TMD.

Actualmente, Cerro Lindo está realizando el minado de tajeos secundarios en los diferentes cuerpos mineralizados, donde las paredes expuestas de los rellenos se muestran estables y en algunos casos inestables, considerando que estos tajeos fueron rellenos en diferentes periodos, se prevé una anomalía y degradación de su resistencia por efecto de los sulfuros y sulfatos.

Con la finalidad de conocer la resistencia *insitu* (real) del relleno y su sensibilidad (variación) en los diferentes tajeos, se han realizado trabajos de investigación geotécnica por métodos de ensayos de penetración estándar SPT y ensayo de penetración dinámica Cono de Peck CPT y extracción de muestras inalteradas.

Posteriormente, se ha realizado un programa de ensayos de laboratorio geotécnico en muestras extraídas de calicatas de 4 m de profundidad y ventanas

de los tajeos, para determinar la densidad, humedad, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la compresión triaxial UU, ensayos de corte directo, granulometría y permeabilidad. Dichos ensayos y extracción de muestras se ejecutaron en cinco tajeos, los cuales fueron seleccionados en coordinación con Cerro Lindo.

Asimismo, se propone realizar el análisis de estabilidad de los tajeos expuestas al relleno, con el objetivo de realizar la calibración de la resistencia y la estabilidad de futuras paredes de los tajeos.

1.1.1. Problema general

¿Cuál es el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo - 2020?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el resultado de la evaluación del periodo de fraguado del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios?
- b) ¿Cuáles son los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios?
- c) ¿Cuáles son los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo – 2020

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar el resultado de la evaluación del periodo de fraguado del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios.

- b) Calcular los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios.
- c) Determinar los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación práctica

La presente investigación propone realizar la investigación de la evaluación de la resistencia del relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios; de esta manera se pretende presentar una propuesta de solución en la inestabilidad de los tajeos.

1.3.2. Justificación metodológica

Con la finalidad de desarrollar de la presente tesis, el investigador hará uso de metodologías propias para la toma de información *insitu*, los cuales serán procesados en forma ordenada y sistemática, estas metodologías podrán servir de base para otras investigaciones similares.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis general

El resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado a través de la resistencia de la cohesión, fricción y factor de seguridad inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo – 2020

1.4.2. Hipótesis específicas

- a) La evaluación del periodo de fraguado del relleno mediante ensayos de penetración, densidad *insitu*, humedad, inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios
- b) Los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios

- c) Los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno permiten evaluar el deterioro por efecto de los sulfuros y sulfatos

1.4.3. Variables

a) Variable Independiente (X):

Resistencia de relleno cementado

Indicadores:

- Periodo de fraguado
- Propiedades físicas y mecánicas
- Resistencia del relleno

b) Variable dependiente (Y)

Estabilidad de tajeos secundarios

Indicadores:

- Características geométricas

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

a) Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas titulada: “*Optimización de las losas de relleno cementado de la U.P. Andaychagua*”. El objetivo general de la investigación fue evaluar el diseño de las mezclas para las losas de relleno cementado en los tajeos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua, para su optimización, y los objetivos específicos fueron:

- Al reducir el relave y aumentar piedra 67 aumentamos la resistencia.
- Determinar el diseño de mezcla utilizando menor cantidad de cemento y material de cantera.
- Reducir el tiempo de ciclo de minado que puede disminuir a la mitad de lo actual. (1)

Producto de su investigación concluye que:

- Los parámetros geomecánicos son imprescindibles para el diseño de la mezcla óptima, sustentando los factores de seguridad para implementar una losa de relleno cementado con una resistencia de 8 MPa, en reemplazo de una losa con una resistencia de 16 MPa.
- El diseño de mezcla óptima en tajeos de 6 m de ancho es aplicable al 25 % de la veta Andaychagua.
- El valor de la resistencia a la compresión uniaxial de las losas de relleno cementado es una función de la cantidad de cemento utilizada en la mezcla, por lo que el cambio de un relleno con una resistencia de 16 MPa a otro de

8 MPa implica una diferencia en el costo del orden de 10,65 \$/m³ y considerando una programación de 12 000 m³ de relleno cementado por mes, genera un ahorro de \$ 123 000. (1)

b) Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas denominada: “*Evaluación técnico-económica y control de las variables de la planta de relleno en Pasta unidad minera Iscaycruz*”. El objetivo general de la investigación es producir y emplazar suficientes cantidades de relleno disponible, con materiales de bajo costo que satisfagan los requerimientos de resistencia compresiva en MPa cuando actúa como pilar en este método de minado con los criterios de proporcionar un piso para minar encima, mantener paredes autoestables para minar al costado, mantener techos estables para minar debajo, solo en los casos de los niveles bases, soportar las cargas laterales del empuje de las cajas; por último, soportar las cargas de cizallamiento por el empuje del relleno convencional (no cementado) contiguo. El objetivo específico es diseñar mezclas materiales donde los integrantes de la unidad cúbica de concreto, conocida usualmente como diseño de mezcla, puede ser definida como el proceso de selección de los ingredientes más adecuados y de la combinación más conveniente y económica de los mismos, con la finalidad de obtener un producto que en el estado no endurecido tenga la trabajabilidad y la consistencia adecuada; y que endurecido cumpla con los requisitos de seguridad y calidad en las labores de minado. (2)

Producto de su investigación concluye que:

- El capital de inversión por la instalación de Paste-Fill fue de \$4 500 000 dólares americanos.
- El ahorro anual, por rellenar los tajeos en la mina con Paste Filll, es de \$ 1 111 548.84 dólares americanos. Por lo tanto, el tiempo de pago de la inversión sin considerar intereses está en el orden de 3.5 a 4 años.
- Con el uso del hidrociclón D-20 con un Vortex de 5 % pulgadas de diámetro. Y con un ápex de 2% pulgadas de diámetro y con una presión en la alimentación de la pulpa al hidrociclón de 12 PSJ se consiguió una granulometría óptima del relave clasificado.

- Por lo tanto, la preparación del Paste-Fill mejoro de 72% de porcentaje de sólidos a 80 % de porcentajes de sólidos.
- Con el incremento del porcentaje de sólidos el tiempo de preparación de PasteFill de 48 horas recirculación a solamente 8 horas.
- Con la granulometría anterior se requería para producir 1 m³ de Paste-Fill 0.0439 horas. Y con la granulometría actual se requiere para producir 1 m³ de Paste-Fill 0.0296 horas.
- Por lo tanto, el costo para producir 1 m³ de Paste-Fill era anteriormente de \$ 0,83 dólares americanos y actualmente es del orden de \$0,56 dólares americanos siendo el ahorro de \$0.27 americanos en consecuencia para una tajea estándar de 2801 m³ el ahorro es de \$756.72 dólares americanos.
- El mejorar la granulometría de Paste-Fill también influye en la mejora de la resistencia del Paste – Fill, bajar el tiempo de fraguado y bajar el consumo de cemento. (2)

c) Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas y Metalurgista titulada: “*Uso de residuos mineros como relleno en minas subterráneas y criterios para un marco regulatorio*”. Este trabajo permitió realizar un análisis de los factores y parámetros involucrados en los posibles efectos ambientales que podrían presentarse por el uso de residuos mineros como relleno de minas subterráneas. (3)

Las conclusiones de la investigación fueron

- La mineralogía de los residuos mineros es el principal factor que determina su estabilidad química, y por lo tanto, su capacidad para ser utilizados como relleno.
- La presencia de agua en la mina, las características de los acuíferos en la zona, las características mineralógicas de la roca encajonante y la ubicación de las obras, también son factores que influyen en los procesos de generación de DA y movilización de EPT contenidos en el yacimiento, que se podrían generar si existiese la posibilidad de que los residuos tuvieran dichos potenciales.

- Los criterios que deben ser considerados, porque en conjunto permiten analizar la forma en la que se podría presentar la interacción del relleno con el agua de la mina y determinar los métodos de control que podrían utilizarse para evitar efectos ambientales, son: características de los residuos que conformarán el relleno, características de acuíferos en la zona minera, características de las operaciones y obras mineras y características climatológicas del sitio
- Estos criterios son los que deberían ser contemplados en la elaboración de una nueva norma oficial mexicana que regule las actividades de relleno de minas, desde una perspectiva ambiental, a las que se refiere el Artículo 34 del Reglamento de la LGPGIR.
- Los procesos de intemperismo del relleno, sus posibles efectos mencionados anteriormente y los factores que influyen en ellos, justifican que las actividades de relleno de minas con residuos, tampoco deberían estar excluidas en el Artículo 5, inciso L, punto III del Reglamento de la LGEEPA de requerir las autorizaciones en materia de impacto ambiental para ser llevadas a cabo. (3)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Relleno de mina

La principal función de los materiales de relleno en las minas es ayudar a manejar la estabilidad del minado relacionado a vacíos, el relleno es una de las herramientas usadas para incrementar la flexibilidad de las estrategias de extracción del mineral y a menudo permite una mayor recuperación del yacimiento mineral. El uso de diferentes tipos de relleno, sus funciones específicas y requerimientos ingenieriles están íntimamente relacionados con los métodos de explotación, planeamiento y secuencias de minado. El material de relleno se utiliza en operaciones mineras al menos por una de las siguientes razones: (4)

- Recuperación de pilares de roca.
- Recuperación de puentes de roca.
- Plataforma o piso de trabajo.
- Soporte del macizo rocoso.

- Eliminación de residuos.
- Minado en la parte superior, al lado o bajo relleno.

Generalmente, el relleno de minas se ha utilizado durante muchas décadas para uno de estos tres propósitos:

- Control de los movimientos del macizo rocoso y de los esfuerzos dentro del horizonte del minado.
- Control de los movimientos del macizo rocoso sobre el horizonte de la mina (subsistencia por minado).
- Almacenamiento de materiales de desecho. El relleno tiene un rol muy importante, no entendido completamente. Los roles del relleno que intervienen en el control del macizo rocoso son:

- ✓ Soporte de bloques de rocas individuales de las paredes de los tajeos, pilares y techos, previniendo el colapso del techo/paredes y también minimizando la subsistencia por minado.
- ✓ Confinamiento lateral del macizo rocoso (pilares, tajeos secundarios, etc.), incrementando su resistencia compresiva.
- ✓ Provisión de un piso adecuado de trabajo en los métodos con entrada de personal.
- ✓ Amortiguación de la respuesta vibracional de la masa rocosa durante eventos sísmicos. El suministro de pequeñas cantidades de confinamiento lateral del relleno a la masa rocosa puede tener una influencia muy beneficiosa en la mejora de la resistencia de la masa de roca. Este hecho se demuestra en las pruebas triaxiales de núcleo de roca, donde una pequeña presión de confinamiento puede aumentar la resistencia de la roca. El relleno tiene el potencial de desempeñar un papel importante en el control de estabilidad del macizo rocoso a gran escala, proporcionando soporte de grandes áreas de las paredes de los tajeos de explotación. La importancia del rol del relleno en el control del macizo rocoso a gran escala es a menudo subestimada. El uso sistemático de un sistema de relleno con ingeniería apropiada en una mina puede permitir altos ratios de extracción

en un determinado tipo de yacimiento mineral en comparación con una mina que no utiliza relleno. Las condiciones mejoradas de seguridad y la alta relación de extracción son el beneficio directo de los rendimientos económicos de la mina.

Las formas más comunes de relleno de mina incluyen: relleno de roca, relleno hidráulico, relleno hidráulico cementado, relleno en pasta y de roca cementada. Cada tipo de relleno tiene sus propios riesgos que necesitan ser abordados durante el diseño, planeamiento y operaciones de la mina. De todas las amenazas planteadas por el relleno para la minería subterránea, la mayor amenaza depende del contenido de agua en el relleno (en particular del relleno hidráulico y el relleno en pasta).

La eliminación de los pilares de roca por debajo de los tajeos rellenos que contienen volúmenes de agua significativos debe ser tratada con extrema precaución, tomando las medidas adecuadas para drenar el agua antes de retirar el pilar. Investigaciones de relleno, implementación y auditoría están disponibles en numerosas fuentes escritas.

Los diferentes tipos de materiales utilizados para rellenar las excavaciones de las minas subterráneas están subdivididos en dos grupos: rellenos sin cemento y rellenos con cemento.

- Rellenos sin cemento
 - Relleno seco y relleno de roca
 - Relleno hidráulico no cementado

- Rellenos con cemento
 - Relleno hidráulico cementado
 - Relleno de roca cementado
 - Relleno en pasta

2.2.2. Relleno sin cemento

2.2.2.1. Relleno seco y relleno de roca

El relleno de roca está conformado por roca residual clasificada o sin clasificar, obtenida de fuentes superficiales o subterráneas, que se coloca normalmente sin el uso de materiales de consolidación en excavaciones de explotación subterránea. El relleno de roca se utiliza en excavaciones seleccionadas en las que se requiere presión de apoyo pasivo para las paredes de roca. Representa una fuente de relleno de costo relativamente bajo, rápido y medianamente fácil de colocar en el sitio. Debido a que permanece sin consolidar, es capaz de ofrecer una capacidad limitada de apoyo a las paredes y pilares de los tajeos de minado. (4)

2.2.2.2. Ventajas y desventajas

Aunque generalmente ha sido reemplazado por otros métodos, todavía existen situaciones en las que la colocación del relleno seco tiene ventajas. Por ejemplo, si una mina no tiene una planta de procesamiento en el sitio para proveer relaves de molino, deben considerarse otras opciones de relleno.

Dichos rellenos podrían incluir arenas superficiales naturales, roca superficial de canteras, o roca generada en obras civiles locales y desmonte de desarrollos subterráneo.

La colocación del relleno seco tiene dos desventajas principales. La primera es que tiene una densidad relativamente baja cuando está colocado, lo que significa que puede sufrir una compresión significativa antes de que alcance su densidad óptima para proporcionar el soporte de las paredes de los tajeos para evitar el desprendimiento de éstos y minimizar los desplazamientos de convergencia de las paredes de los tajeos. En segundo lugar, dependiendo de la configuración del techo, puede ser difícil colocar el relleno seco cerca al techo del tajeo y a lo largo del tajeo.

Las principales propiedades y parámetros de estos rellenos son los siguientes:

- Peso unitario aparente
- Peso unitario húmedo

- Ángulo de reposo
- Ángulo de fricción
- Distribución de tamaños de partículas
- Cohesión aparente
- Resistencia al corte

2.2.3. Relleno hidráulico

El relleno hidráulico se usa en los tajeos de explotación. Las labores de acceso que interceptan con los tajeos son tapadas con la construcción de tapones/barreras. Estos últimos son proveídos con un sistema para drenar el agua del relleno. El relleno hidráulico vertido a través del taladro de relleno entra a la cámara del tajeo por el techo y el agua clara tiende a acumularse en la superficie del relleno. Todo el relleno que entra al tajeo como relleno hidráulico tiene un drenaje a través de los tapones/barreras.

Los relaves deslamados y parcialmente deshidratados son los materiales de relleno más comúnmente transportados en subterráneo por vía hidráulica, pero también se transporta de esta manera la arena superficial. La porción fina (lamas) es indeseable debido a su drenaje lento, y también debido a las consecuencias desastrosas del potencial de licuefacción y al efecto de las vibraciones por las voladuras de producción. Las propiedades y parámetros relevantes del relleno hidráulico son las siguientes:

- Relación de vacíos y porosidad
- Densidad relativa
- Permeabilidad
- Presión de tierras activas y pasivas
- Esfuerzos efectivos
- Peso unitario aparente, saturado y sumergido
- Resistencia al corte (ϕ y c)
- Filtración, drenaje y flujos netos o dirección de flujos
- Sifonamiento
- Licuefacción

2.2.4. Relleno con cemento

2.2.4.1. Relleno hidráulico cementado

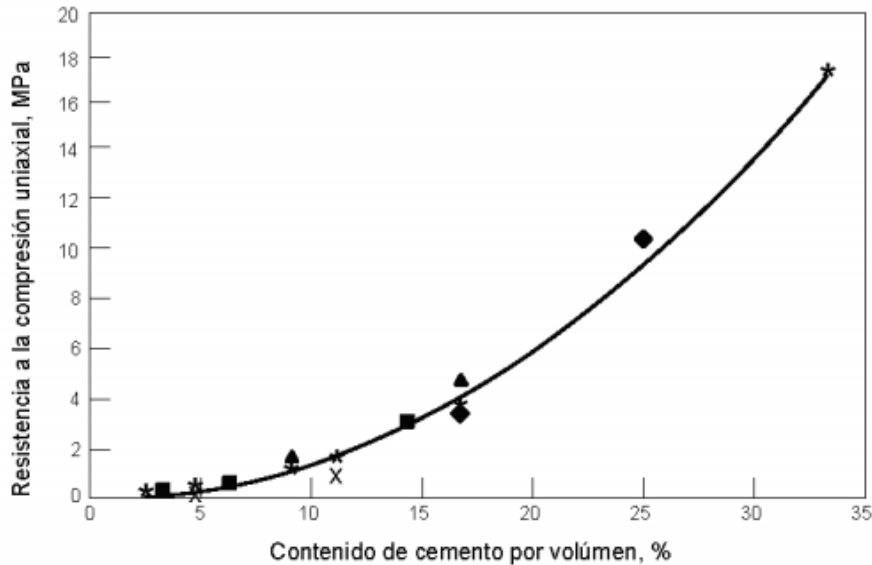
El relleno hidráulico no cementado correctamente preparado es predominantemente de arena y debe comportarse como arena, aunque en ocasiones puede comportarse como una arena de drenaje lento. En consecuencia, no tiene una cohesión verdadera hasta que esté drenado, ni tiene resistencia compresiva no confinada; generalmente es deseable que el relleno sea capaz de permanecer en un área tras su exposición. Para tales aplicaciones, es habitual añadir cemento al relleno (pero en ocasiones no es necesario).

Debido a que el relleno cementado es el mismo material del no cementado, a excepción del cemento, varios de los parámetros de diseño para un sistema de relleno hidráulico cementado son los mismos que para un sistema de relleno no cementado. Sin embargo, el cemento proporciona finos a la mezcla y la tasa de drenaje es típicamente algo más lenta que la del relleno no cementado.

La operación del relleno se mueve desde la disposición subterránea de los residuos mineros hasta la preparación de un material de ingeniería controlado por la calidad de contenido de cemento frente a las propiedades de resistencia y deformación.

2.2.4.2. Contenido de cemento versus las propiedades de resistencia y deformación

La resistencia de un relleno cementado depende del porcentaje de cemento en el relleno. La figura siguiente muestra la relación entre el contenido de cemento y la resistencia de varios rellenos cementados de mina en Canadá y Australia.



Nota: Los símbolos representan diferentes minas.

Figura 1. Contenido de cemento (% volumen) vs resistencia compresiva uniaxial Tomado de Douglas F. Hambley

El contenido de cemento, como un porcentaje de volumen, es mejor expresarlo como un porcentaje en masa del total de sólidos secos. La ecuación de la curva de ajuste óptimo viene dada por:

$$C_o = 12.1 P^{2.0448}$$

Donde:

C_o: Resistencia compresiva en kilopascales (kPa), multiplicado por el resultado por 0.145 para obtener la resistencia en Psi.

P: Contenido de cemento en porcentaje de volumen.

Algunas minas han experimentado la sustitución de parte del cemento por cenizas o escorias de tierra y/o materiales puzolánicos parecidos. En el caso de las cenizas, no parece haber una diferencia significativa en la resistencia a la compresión.

Altura libre

La altura libre del relleno cementado depende de la resistencia a la compresión y de la densidad del relleno como sigue:

$$H = 2C_o/y_g$$

Donde:

Co: Resistencia compresiva en Kilopascales (kPa)

H: Altura del relleno

y: Densidad del relleno

En la práctica, los parámetros de la ecuación anterior: la resistencia a la compresión necesaria y la altura requerida, sirven para que el relleno se mantenga sin ayuda a esa altura. Por ejemplo, si la altura libre requerida es de 8 m y la gravedad específica del relleno es 1,7, el resultado indica que la resistencia requerida es 133 kPa (19.3 psi). La resistencia corresponde a un relleno que contiene aproximadamente 3% de cemento. Alternativamente, para una resistencia compresiva de 133 kPa, se obtiene un contenido de cemento de 3,22%, lo que equivale a una relación cemento/residuo de 1:30.

Las propiedades y parámetros relevantes del relleno hidráulico cementado son los siguientes:

- Relación de vacíos y porosidad
- Densidad relativa
- Permeabilidad
- Resistencia al corte
- Esfuerzos efectivos
- Peso unitario aparente, saturado y sumergido
- Presión de tierras laterales
- Filtración, drenaje
- Licuefacción
- Reología de los slurries

2.2.4.3. Relleno de roca cementado

El relleno de roca cementado es típico de la práctica moderna. Un sistema de rellenado de roca cementado se desarrolló en Mount Isa, Australia, a finales de la década de 1960, donde la principal razón para el componente de relleno era reducir las cantidades de relleno hidráulico cementado, ya que el cemento portland era caro en esa parte de Australia. En un sistema de relleno de roca

cementada, la principal función de diseño del relleno hidráulico cementado es llenar los vacíos existentes en la roca rota.

2.2.4.4. Consideraciones del tamaño de relleno de roca

Los rellenos de roca deben consistir en fragmentos angulares gruesos de densidad media a alta, y alta resistencia a la abrasión. La resistencia a la abrasión se puede probar usando la prueba de abrasión de Los Ángeles. El relleno de roca se puede modificar para adaptarse a una aplicación particular optimizando la distribución del tamaño de partícula. Un relleno competente, que permanecerá de pie cuando esté expuesto en una cara vertical, deberá tener una baja porosidad. El relleno debe ser clasificado apropiadamente con respecto al tamaño de partículas. La distribución del tamaño de partícula de una masa de roca se representa a menudo por la distribución de Gates – Gaudin -Schuhmann:

$$P = \left(\frac{d}{m} \right)^n$$

Donde:

P: Porcentaje acumulativo de fino mayor que el tamaño d

H: Tamaño de partícula

y: Tamaño máximo de partícula

En la industria del concreto, un material de relleno densamente empacado se obtiene cuando el exponente, n, en la ecuación anterior es 0.5

2.2.4.5. Material cementante

El material cementante en un relleno de roca cementada puede consistir en relleno de relaves deslamados, relleno de relaves deslamados cementados, relleno en pasta, cemento portland, ceniza u otra puzolana, o una combinación de dos o más de éstos. Todos estos materiales cementantes se transportan con más facilidad por la tubería para ser añadido al relleno de roca a medida que entra en la parte superior o en alguna parte más apropiada en el tajeo. La estandarización de esta práctica es difícil y los tajeos grandes deben ser tratados caso por caso. Las propiedades y parámetros relevantes son las mismas del relleno seco/relleno de roca y del relleno cementado.

2.2.4.6. Relleno en pasta

El relleno en pasta está formado por la combinación de relaves y material cementante con cierta cantidad de agua para lograr la consistencia de una pulpa espesa. Debe haber suficiente cantidad de finos en el relave para el buen comportamiento de la pasta.

Con el relleno de pasta, los relaves se convierten en un *slurry* de alta densidad con un contenido de sólidos de 75 % - 80 % en masa. El *slurry* actúa como un sólido viscoso, para el que se debe superar una resistencia al corte crítico antes de que el material fluya. La resistencia al corte crítico de los rellenos en pasta típicamente oscila entre 250 y 800 Pa.

Debido a la naturaleza viscosa de la pasta y a las grandes cantidades de energía necesarias para transportar la pasta en el régimen turbulento, es habitual transportar pasta en el régimen de flujo laminar.

En cuanto a los requerimientos del tamaño de partícula de la pasta, al menos el 15% de las partículas en la pasta deben ser más finas que 20 μm o 0.00079 in. (4)

En suma, se acostumbra añadir de 3 % a 6 % de cemento portland o una mezcla de cemento portland y cenizas como material cementante. Si los relaves contienen cantidades insuficientes, puede ser necesario añadir cenizas o cemento adicional.

Las propiedades y parámetros relevantes del relleno en pasta son los siguientes:

- Las mismas que el relleno hidráulico sin y con cemento.
- Reología de la pasta.

2.2.4.7. Recomendaciones y ensayos para el relleno

En toda operación de relleno de labores explotadas, se deberá cumplir con las siguientes medidas de seguridad:

- Realizar estudios de resistencia, granulometría, límites de contenido de agua, estabilidad física y química del material de relleno.

- Encontrar la resistencia a la compresión uniaxial ideal del relleno en función de su densidad, del ancho, altura y longitud del tajeo.

En el caso de relleno hidráulico se deberá contar con:

- El estudio hidrogeológico de la zona a rellenar.
- Pruebas de laboratorio para determinar la velocidad de percolación, velocidad de compactación, densidad relativa y velocidad de consolidación.
- Diseño de los tapones hidráulicos, del drenaje de relleno y de la infraestructura de transporte de relleno.

Para mayor referencia, revisar los artículos 226 y 227 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería

2.3. Definición de términos básicos

- **Análisis granulométrico**

Determina la distribución del tamaño de las partículas o granos que constituyen un material. Esta distribución se analiza en base a su porcentaje de su peso total. La fracción muy gruesa consiste de fragmentos de rocas compuestas de uno o más minerales, pudiendo estas ser angulares, redondeados o planos. Pueden ser frescos o mostrar signos de alteración, resistentes o deleznable. Esta fracción recibe el nombre genérico de grava. En las fracciones finas y muy finas, cada grado está constituido de un solo mineral. Las partículas pueden tener formas angulares, tubulares o escamas, pero nunca redondeadas.

- **Cementación**

La cementación de los rellenos hidráulicos puede tomar muchos años, dependiendo principalmente de la composición química del relleno.

- **Coeficiente de uniformidad (CU)**

Se define como la razón del diámetro de partícula más grande que se encuentra en el 60 % de fracción acumulativa (-) del material, al diámetro de la

partícula de mayor tamaño presente en el 10 % de la fracción acumulativa (-) del material². Se calcula dividiendo el D60 entre el D10 del material.

- **Cohesión (C)**

Es la atracción existente entre las partículas de un suelo, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. La cohesión de un relleno variará si cambia su contenido de humedad, en las arenas la cohesión es prácticamente nula.

- **Dureza de los sólidos**

Esta característica determina el tipo y material del equipo a utilizarse en su transporte. En la tabla siguiente se da el grado de dureza de materiales sólidos según la escala de Mohs.

- **Fricción interna (ϕ)**

Es la resistencia al deslizamiento debido a la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas. Depende de la granulometría del material, de la forma de las partículas y de su densidad. En caso del material fino, se tendrá una fricción interna baja. En caso de arenas el ángulo de fricción interno es alrededor de 30°.

- **Gravedad específica de los sólidos**

Es la relación entre el peso específico del sólido y el peso específico del agua.

- **Porosidad**

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del material. Si la porosidad se expresa en porcentaje (%), se denomina porcentaje de vacíos.

- **Pulpa**

Se define como pulpa a la mezcla constituida por una fase sólida y una líquida, donde la fase líquida transporta a la sólida en suspensión.

- **Pulpa heterogénea**

Los relaves, arenas, concentrados de minerales se comportan como mezclas, ya que el líquido y los sólidos se comportan independientemente, denominándose al conjunto sólido-líquido, mezcla o pulpa heterogénea.

- **Pulpa homogénea**

Este tipo de pulpa se comporta como un fluido plástico de Bingham, es decir que las propiedades del agua se afectan por la presencia de los sólidos, por ejemplo, las arcillas.

- **Relleno hidráulico**

El relleno hidráulico es una alternativa para rellenar los tajos explotados por el método de corte y relleno; esta alternativa empleada en el Perú desde mediados de la década de los años 60, se introdujo con la finalidad de incrementar la productividad, mas no con fines ecológicos. El relleno hidráulico, que es más eficiente que el relleno neumático, el relleno hidroneumático y el recientemente introducido relleno en pasta, fue el que en muchos casos reemplazó al relleno detrítico o relleno sólido transportado en carros mineros o en camiones, desde las canteras hasta los tajeos y a un costo mucho más elevado que los otros métodos de relleno que se efectúan transportando los sólidos en medios fluidos por tubería e impulsados por bombas.

- **Tamaño máximo de las partículas**

Debido a que las partículas de mayor tamaño tienden a sedimentarse más rápido que las partículas menores, es necesario conocer el tamaño máximo de las partículas sólidas para así determinar la velocidad máxima de sedimentación que tendrán.

- **Velocidad de percolación (V.P.)**

Es una medida de la velocidad con el que el agua pasa a través del material de relleno.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcances de la investigación

3.1.1. Método general

El método general de la investigación es el científico, debido que la finalidad generar nuevo conocimiento a través del empirismo y la medición la cual está sujeto a la razón, para encontrar la solución al problema planteado.

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, debido a que en una primera instancia se aplicara los conocimientos de la investigación básica para solucionar el problema de la estabilidad de tajeos secundarios.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo, el propósito consiste en explicar y buscar las causas que generan el problema de la de la estabilidad de tajeos secundarios.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación es experimental, debido que la variable independiente será manipulada para encontrar el efecto en la variable dependiente sobre la estabilidad de tajeos secundarios.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población está conformada por 5 tajeos, los cuales se describen a continuación:

- ✓ Tajeo 950
- ✓ Tajeo 016-N
- ✓ Tajeo 014-N
- ✓ Tajeo 018
- ✓ Tajeo 760

Unidad minera Cerro Lindo.

3.3.2. Muestra

La muestra censal está conformada por 5 tajeos, los cuales se describen a continuación

- ✓ Tajeo 950
- ✓ Tajeo 016-N
- ✓ Tajeo 014-N
- ✓ Tajeo 018
- ✓ Tajeo 760

Unidad minera Cerro Lindo

3.4. Técnicas e instrumento de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

- ✓ Observación
- ✓ Entrevista
- ✓ Encuesta

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

- ✓ Ficha de observación de campo
- ✓ Ficha de entrevista personalizada
- ✓ Ficha de encuesta

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

Milpo S.A. es una empresa dedicada a la actividad minera que actualmente opera la unidad minera Cerro Lindo, el mismo que está ubicado en el distrito de Chavín, provincia de Chincha – Ica, al SE de Lima, a una altitud de 1820 m s. n. m., produce concentrados de zinc, cobre y plomo. La capacidad actual de procesamiento es de 18 000 TMD. Actualmente, Cerro Lindo está realizando el minado de tajeos secundarios en los diferentes cuerpos mineralizados, donde las paredes expuestas de los rellenos se muestran estables y en algunos casos inestables, considerando que estos tajeos fueron rellenos en diferentes periodos, se prevé una anomalía y degradación de su resistencia por efecto de los sulfuros y sulfatos.

Con la finalidad de conocer la resistencia *insitu* (real) del relleno y su sensibilidad (variación) en los diferentes tajeos, se han realizado trabajos de investigación geotécnica por métodos de ensayos de penetración estándar SPT y ensayo de penetración dinámica Cono de Peck CPT y extracción de muestras inalteradas, detallados en el presente informe. Posteriormente, se ha realizado un programa de ensayos de laboratorio geotécnico en muestras extraídas de calicatas de 4 m de profundidad y ventanas de los tajeos, para determinar la densidad, humedad, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la compresión triaxial UU, ensayos de corte directo, granulometría y permeabilidad.

Dichos ensayos y extracción de muestras se ejecutaron en 5 tajeos, los cuales fueron seleccionados en coordinación con Cerro Lindo.

Asimismo, en la segunda etapa de estudio se realizaron el retro análisis de estabilidad de los tajeos que fallaron en los taludes de las paredes expuestas de relleno, con el objetivo de realizar la calibración de la resistencia y la estabilidad de futuras paredes de los tajeos. En atención a la solicitud de Milpo, SRK Consulting (Perú) en adelante (SRK), se complace en presentar el informe de avance del “Estudio de evaluación de la resistencia del relleno de mina *insitu* y calibración del dimensionamiento de tajeos secundarios de la unidad minera Cerro Lindo”.

Los alcances del presente estudio se indican a continuación, las mismas que están ordenados de manera secuencial:

- **Trabajos preliminares:**

Revisión de la información y selección de 5 tajeos a ser evaluados, en coordinación con Cerro Lindo; y, establecimiento de criterios de diseño.

- **Investigaciones de campo y laboratorio:**

- ✓ Visita técnica a la mina.
- ✓ Supervisión y muestreo de relleno por el método de tallado en las ventanas (similar al muestreo de arcillas).
- ✓ Supervisión y excavación de calicatas en el nivel superior de los tajeos hasta 3 a 5 m de profundidad, donde se realizará el muestreo de bloques y ensayos de densidad *insitu*.
- ✓ Supervisión y ejecución de la de perforación *wash boring*, donde se realizará ensayos de penetración estándar SPT a cada 1 m de profundidad (se espera alcanzar hasta 15 m de profundidad).
- ✓ Supervisión y ejecución de ensayos de penetración dinámica Cono de Peck (servirá para penetrar el sondeo de 15 hasta 25 m de profundidad).

- ✓ Supervisión de ensayos de resistencia y propiedades físicas del relleno en laboratorio externo.

Evaluación de la resistencia del relleno existente y estabilidad de Paredes expuestas de relleno; y,

- ✓ Caracterización y evaluación de la resistencia del relleno a partir de los ensayos de campo.
- ✓ Cálculo de retro análisis de estabilidad en tajeos derrumbados, para calcular la resistencia el relleno al momento de la falla y calibración de la resistencia del relleno existente.
- ✓ Dimensionamiento de los tajeos secundarios, en base a la resistencia calibrada del relleno.

- **Reporte final**

- ✓ Memoria descriptiva;
- ✓ Gestión de proyecto; y,
- ✓ Discusión del informe con el personal representate de la empresa.

- **Información revisada**

SRK cuenta con la información de los estudios descritos a continuación, así como la información de modelos geológicos, sólidos tridimensionales de los tajeos explotados y topografía subterránea de niveles en archivos *Minesight* proporcionados por la empresa.

- ✓ Reporte estudio e ingeniería de producción y transporte de pasta cementada, Golder, 2012.
- ✓ “Estudio geomecánico para el dimensionamiento, secuencia y relleno de tajeos de la mina Cerro Lindo”, SVS Ingenieros (SRK), 2015.
- ✓ Levantamientos topográficos de la explotación de tajeos primarios y secundarios.

- ✓ Historial de granulometría del relleno durante los años 2015 y 2016, Cerro Lindo.

4.2. Criterios de diseño

El criterio de diseño que vienen siendo considerados para el presente estudio son los siguientes:

Tabla 1. Criterios de diseño

Criterio	Valor	Autor o comentario
Periodo de control de resistencia	7 a 180 días	SRK
% de cemento en la mezcla	3%	Cerro Lindo
Factor de seguridad mínimo de diseño	1.2	SRK

4.2.1. Investigaciones de campo y laboratorio

- **Periodos de fraguado del relleno evaluado**

El período de rellenado, según los reportes de la mina Cerro Lindo, van desde 1 a 3 semanas. La antigüedad del relleno ha sido determinada a partir del último día de rellenado del respectivo tajeo hasta la fecha en la que se realizaron los ensayos de campo (23/02/2016), ensayos tales como SPT, CPT, densidad insitu, humedad, de igual manera, se calculó la antigüedad del relleno de las muestras ensayadas en el laboratorio de Geotecnia "Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres" CISMID (22/03/2016).

Tabla 2. Periodos de fragua de las muestras ensayadas

Nivel base	Nivel superior	Tajo	Fecha de rellenado		Antigüedad	
			Inicio	Final	Ensayo insitu (días)	Ensayo en laboratorio (días)
1680	1710	T-950CN	30/12/2015	08/01/2016	46	74
1680	1710	T-14B	24/11/2015	01/12/2015	84	112
1740	1770	T-018	14/10/2015	31/10/2015	115	143
1710	1740	T-016	18/09/2015	04/10/2015	142	170
1910	1940	T-760	19/04/2015	29/04/2015	300	328
(*) 1740	1770	T-008S	14/10/2015	31/10/2015	115	143

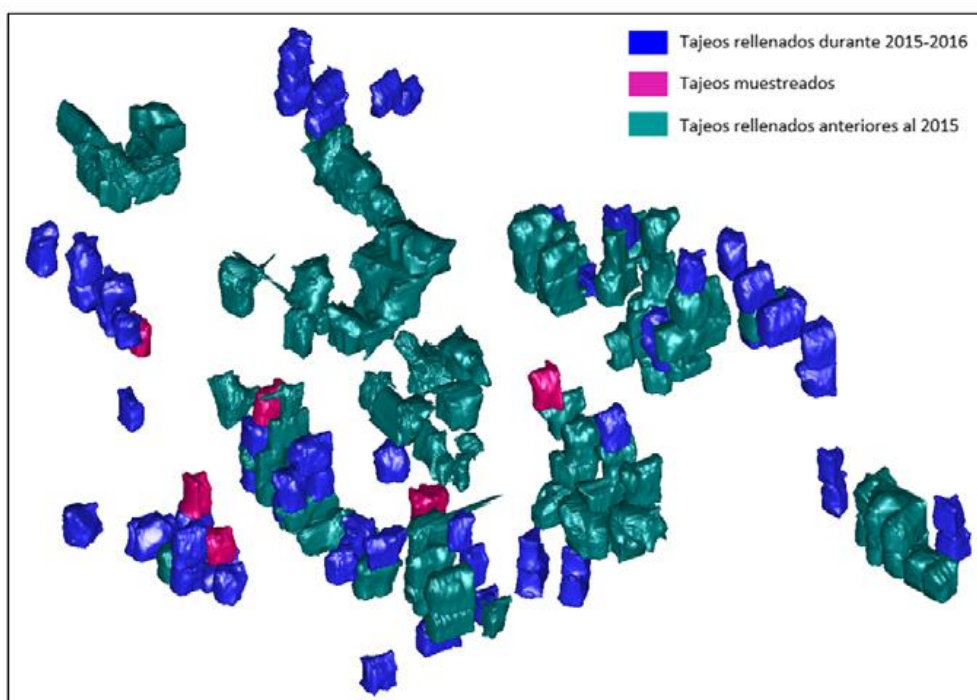


Figura 2. Vista isométrica

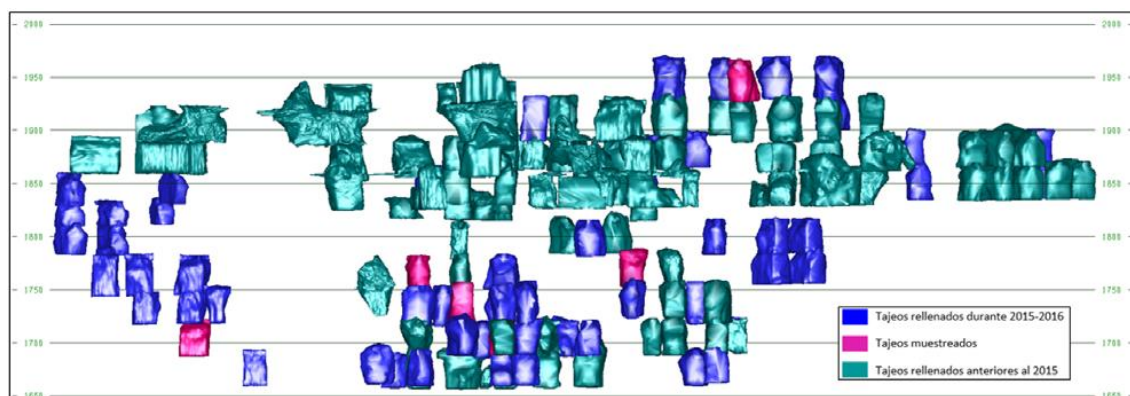


Figura 3. Vista frontal

4.2.2. Investigaciones geotécnicas de campo

- **Muestreo de relleno por el método de tallado en ventanas**

La metodología para obtener los bloques de relleno fue construir una calicata desde la parte superior del tajeo relleno y obtener muestras inalteradas a 2 y 4 metros de profundidad, tallándolas *insitu*. Estas muestras, en forma de un cubo, con dimensiones promedio de 22 cm de lado, posteriormente fueron parafinadas para que las muestras mantengan las condiciones y evitar la pérdida de humedad durante el transporte.

De la misma manera se han aperturado los tapones de las ventanas inferiores al tajeo, para extraer muestras inalteradas.

En la figura siguiente se muestra de manera esquemática la ubicación de los puntos de muestreo en cada uno de los tajeros evaluados.

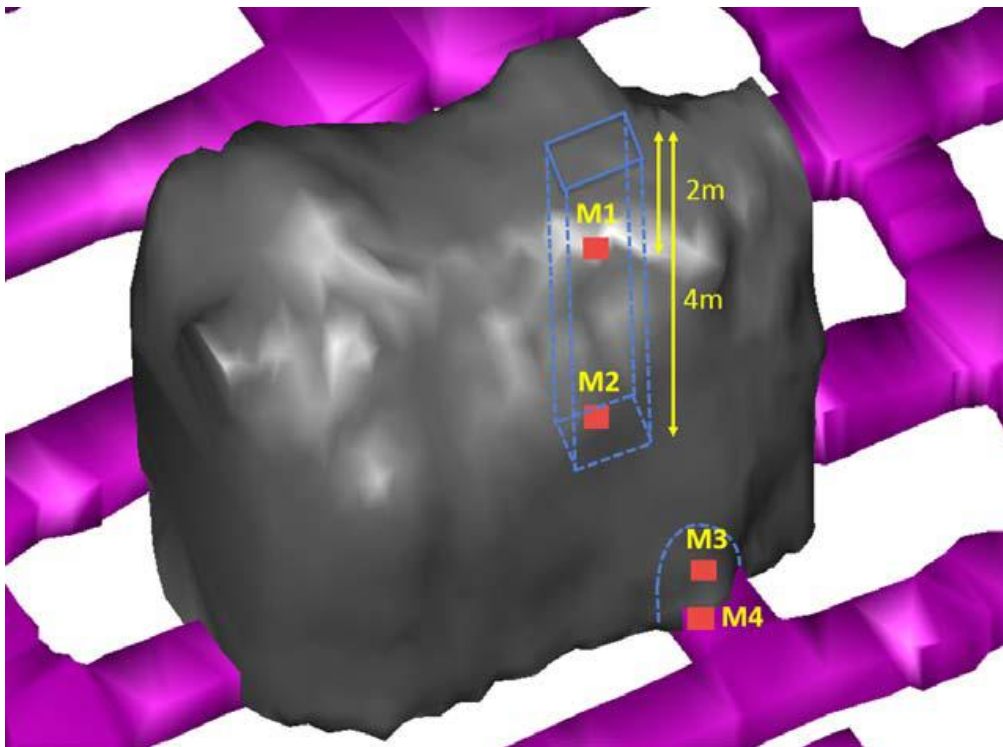


Figura 4. Ubicación de muestras inalteradas extraídas de los tajeros rellenos

Todas las muestras fueron embaladas, rotuladas y aisladas con parafina, posteriormente transportadas cada una en cajas de madera en viruta, desde la mina Cerro Lindo al laboratorio de Geotecnia CISMID de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), los resultados de los ensayos se detallan en el anexo B.

Tabla 3. Relación de muestras extraídas en la campaña de trabajos de campo

N°	Muestra	Tajo	Nivel	Cuerpo	Profund. (m)	Lugar	observación
1	M-3	8	1740	OB5	27	Ventana	Cerca al techo de la ventana
2	M-4	8	1740	OB5	28.5	Ventana	Cerca al techo de la ventana
3	M-1	14	1710	OB5B	2	Calicata	
4	M-2	14	1710	OB5B	4	Calicata	
5	M-3	14	1710	OB5	27	Ventana	Cerca al piso de la ventana
6	M-4	14	1710	OB5	28.5	Ventana	No extraído
7	M-1	16	1740	OB5B	2	Calicata	
8	M-2	16	1740	OB5B	4	Calicata	
9	M-3	16	1740	OB5	27	Ventana	Cerca al piso de la ventana
10	M-4	16	1740	OB5	28.5	Ventana	Cerca al piso de la ventana
11	M-1	18	1770	OB5	2	Calicata	Blando
12	M-2	18	1770	OB5	4	Calicata	No extraído
13	M-3	18	1770	OB5	27	Ventana	Cerca al techo de la ventana
14	M-4	18	1770	OB5	28.5	Ventana	Cerca al techo de la ventana
15	M-1	760	1940	OB6	2	Calicata	
16	M-2	760	1940	OB7	4	Calicata	
17	M-3	760	1940	OB6	27	Ventana	Cerca al techo de la ventana
18	M-4	760	1940	OB6	28.5	Ventana	Cerca al techo de la ventana
19	M-1	950	1710	OB2	2	Calicata	
20	M-2	950	1710	OB2	4	Calicata	
21	M-3	950	1710	OB2	27	Ventana	Cerca al techo de la ventana
22	M-4	950	1710	OB2	28.5	Ventana	Cerca al techo de la ventana

Las muestras obtenidas tanto en las ventanas como en las calicatas son de relleno en pasta con un contenido aproximado de cemento de 3 %, cabe mencionar que se la muestra extraída del Tajo 008s, del OB5, nivel 1740, no contiene cemento en el diseño de su mezcla, la misma que fue adicionada tras la solicitud de Cerro Lindo.

4.2.3. Excavación de calicatas con medición de densidad *insitu* y humedad

El programa de investigación geotécnica comprendió la ejecución de cinco (05) calicatas, denominadas C-01 a C-05, las cuales se efectuaron en el nivel superior de los tajeos rellenos, una por tajeo. Todas las calicatas alcanzaron una profundidad de 4.0 m. En la Tabla 2.3 se indican las características de dichas calicatas.

Tabla 4. Características de las calicatas efectuadas

Calicata	Ubicación	Profundidad alcanzada (m)
C-01	Tajo 950	4.00
C-02	Tajo 016-N	4.00
C-03	Tajo 014-N	4.00
C-04	Tajo 018	4.00
C-04	Tajo 760	4.00

En cada una de ella se efectuaron pruebas de densidad *insitu* mediante el método del cono de arena (ASTM D-1556), a 2.00, 3.00 y 4.00 m de profundidad. En la tabla 5 se muestra el resumen de los valores de densidad obtenidos mediante estos ensayos.

Tabla 5. Resumen de los ensayos de densidad Insitu efectuados

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Contenido de humedad %	Densidad seca global (gr/cm ³)
C-01	D1	2.00	19.32	2.18
	D2	3.00	23.24	2.01
	D3	4.00	21.16	1.93
C-02	D1	2.00	19.13	2.00
	D2	3.00	22.09	1.95
	D3	4.00	21.58	1.93
C-03	D1	2.00	18.96	2.20
	D2	3.00	18.81	1.94
	D3	4.00	21.95	1.92
C-04	D1	2.00	51.62	2.07
	D2	4.00	23.24	1.88
C-05	D1	2.00	19.31	2.09
	D2	3.00	19.74	2.17
	D3	4.00	21.48	2.08

Asimismo, en cada una de las calicatas se registró cuidadosamente el perfil estratigráfico y se clasificaron visualmente los materiales encontrados de acuerdo a los procedimientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS - norma ASTM D-2488), extrayéndose muestras representativas de los materiales típicos, las cuales debidamente protegidas e identificadas fueron remitidas al laboratorio de suelos para su análisis.

4.2.4. Ensayos de penetración SPT y cono de Peck

El programa de investigación geotécnica comprendió la ejecución de cinco (05) ensayos de penetración estándar (SPT), una por cada tajeo evaluado, a cada 2.00 metros de profundidad. También, se efectuaron cinco (05) auscultaciones dinámicas mediante el Cono de Peck, estos sondeos se realizaron comenzando en las profundidades de fin de los ensayos SPT y se extendieron hasta profundidades comprendidas entre 17.20 y 27.10 m con respecto a la superficie natural del terreno. Cabe señalar que además de estos cinco sondeos de Cono de Peck, se efectuó uno en el tajo 016 – Norte, desde la

superficie hasta los 22 m de profundidad, esto a fin de utilizar los valores obtenidos para establecer una correlación con el ensayo SPT.

En la tabla siguiente se indican las coordenadas de ubicación y las profundidades alcanzadas por cada uno de los sondeos ejecutados.

Tabla 6. Características de los ensayos SPT y Cono de Peck efectuados

Ubicación	SPT		Cono de Peck	
	Prof. Inicio (m)	Prof. Fin (m)	Prof. Inicio (m)	Prof. Fin (m)
Tajo 950	0.00	15.60	15.60	25.35
Tajo 016-N(*)	0.00	22.60	22.60	27.10
Tajo 014-N	0.00	24.60	24.60	26.55
Tajo 018	0.00	24.60	24.60	25.50
Tajo 760	0.00	16.60	16.60	17.20

Tomado de SRK, 2016

(*) En el tajo 016-N se efectuó un sondeo adicional con Cono de Peck desde la superficie del terreno hasta los 22.1 m, para efectuar la calibración.

4.2.5. Correlación del Cono de Peck y SPT

Los resultados de los ensayos de Cono Peck, servirán para estimar, a partir de correlaciones con el ensayo SPT, parámetros de resistencia del suelo, por ello resulta necesario mencionar en qué consiste este ensayo y cuál es su correlación con el ensayo SPT. El Cono de Peck es un método dinámico de auscultación que consiste en hincar en el terreno una barra de 2 pulgadas de diámetro, provista en su parte inferior de una punta cónica de 2.5 pulgadas de diámetro y un ángulo de 60° en el vértice. La hincada se efectúa en forma continua, empleando un martillo de 140 libras de peso y 30 pulgadas de caída, registrándose el número de golpes requeridos por cada 15 cm de penetración; los resultados se presentan en un registro continuo de número de golpes por cada 30 cm de penetración.

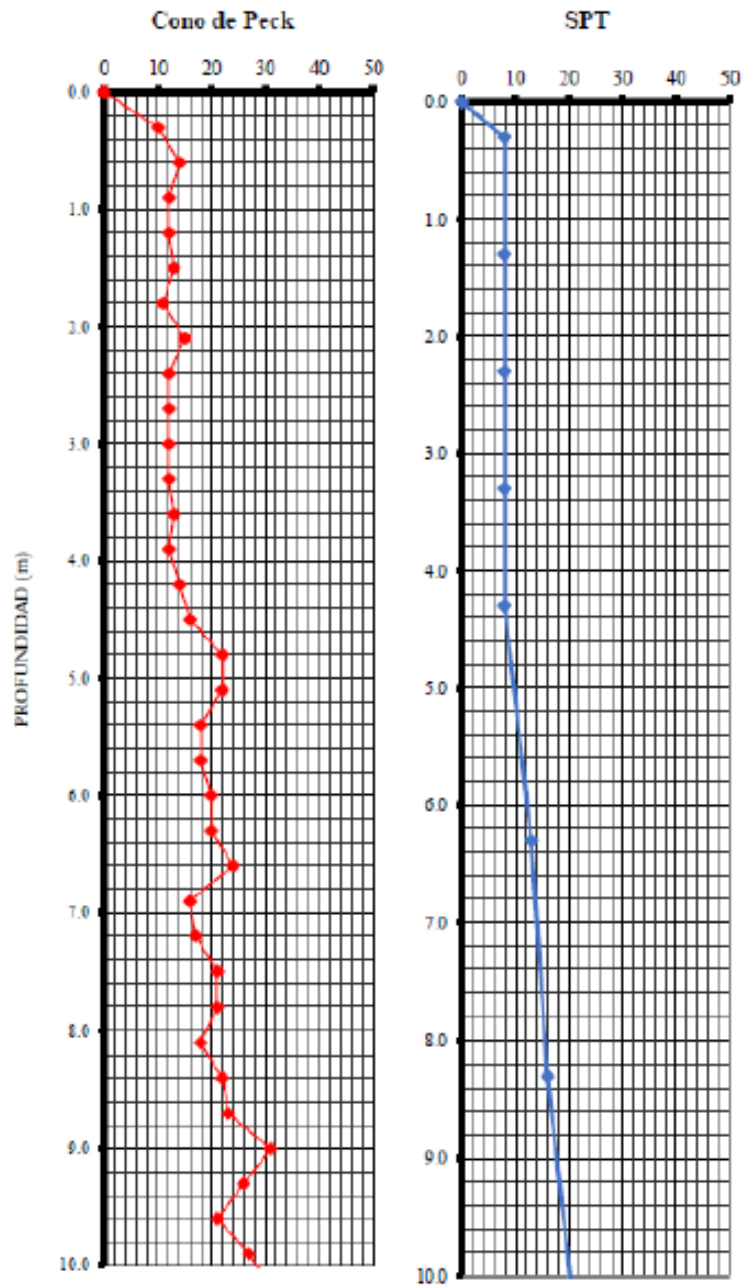


Figura 5. Comparación de resultados de SPT y Cono de Peck, se contabiliza número de golpes por cada 30 cm de penetración

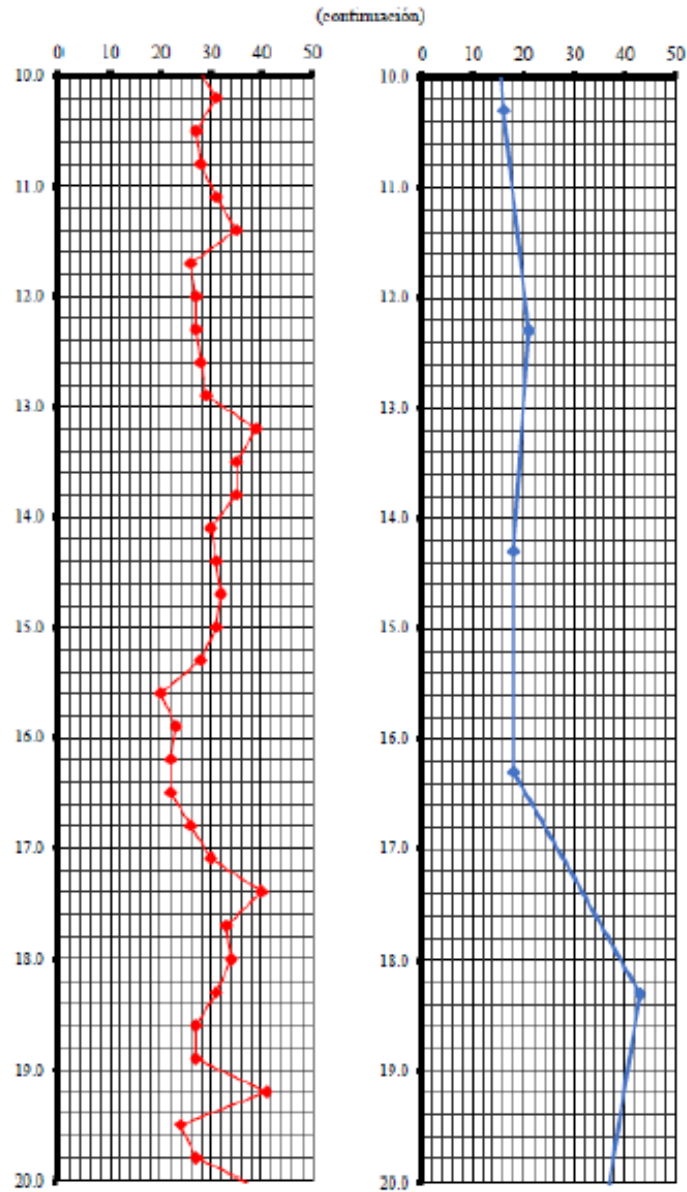


Figura 6. Comparación de resultados de SPT y Cono de Peck, se contabiliza número de golpes por cada 30 cm de penetración

Este cono ha sido calibrado mediante correlación estadística con el ensayo de penetración estándar (SPT), comparando los resultados obtenidos por ambos procedimientos exploratorios en sondeos muy cercanos realizados en el tajo 016-N, para un rango de profundidades similares. La calibración obtenida es la siguiente:

$$N = 0.8C_n$$

Donde:

- ✓ **N** = Número de golpes por 30 cm de penetración en el ensayo de penetración estándar (ASTM D-1586).
- ✓ **C_n** = Número de golpes por 30 cm de penetración mediante auscultación con el Cono de Peck.

De esta manera, es posible utilizar los valores obtenidos con el Cono de Peck para calcular su equivalente en SPT. Dicho todo esto, será necesario obtener una correlación a fin de obtener el ángulo de fricción a partir de los valores de N de SPT.

4.2.6. Correlación de Angulo de fricción vs “N” de SPT

A lo largo del tiempo, diversos autores han presentado estudios de correlación para la obtención del ángulo de fricción a partir del valor de número de golpes N del ensayo SPT, ya sea con el dato original obtenido en campo o con el valor corregido por factores varios.

En el caso de la evaluación realizada en este proyecto, se han utilizado las siguientes correlaciones:

Para valores de N corregido (N1)

- **Peck, Hanson y Thornburn (1974)**

La correlación gráfica propuesta por Peck, Hanson y Thornburn puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\phi = 54 - 27.6034 (e^{-0.014N1})$$

- **Muromachi (1974)**

En 1974, Muromachi propuso una correlación para estimar el ángulo de fricción en suelos granulares a partir de los valores obtenidos en el ensayo de SPT de la siguiente manera:

$$\phi = 20 + 3.5(N1)^{0.5}$$

- **Hatanaka y Uchida (1996)**

Obtenida a partir una serie de ensayos triaxiales drenados sobre muestras inalteradas de arena, a fin de determinar el ángulo de fricción. Las muestras inalteradas eran recuperadas congelando el suelo, y el ángulo de fricción obtenido era comparado con las ecuaciones empíricas propuestas por muchos investigadores utilizando el SPT.

A partir de estos cálculos, propusieron la siguiente correlación para el cálculo del ángulo de fricción:

$$\phi = (20N)^{0.5} + 20$$

Para valores de N sin corregir

- **Dunham (1954)**

En 1954, Dunham planteó una de las primeras formulaciones para establecer una correlación entre el ángulo de fricción interna y el número de golpes del ensayo de SPT en suelos arenosos uniformes. La expresión que define esta correlación se expresa de la siguiente manera:

$$\phi = (12N)^{0.5} + 20$$

- **Ohsaki (1959)**

Una de las fórmulas más comúnmente usadas en Japón para la estimación del ángulo de fricción interna es la de Ohsaki, planteada a partir de información de suelos arenosos. Esta fórmula se detalla a continuación:

$$\phi = 15 + (12N)^{0.5}$$

- **Wolff (1989)**

Basado en la correlación gráfica presentada por Peck, Hanson y Thornburn en 1974, Wolff estableció una ecuación aproximada, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\phi = 27.1 + 0.3N - 0.00025 N^2$$

A partir de estas correlaciones, se obtuvieron valores de los ángulos de fricción para cada uno de los ensayos de SPT realizados. Los resultados se muestran en el anexo C.

4.2.7. Correlación del valor de cohesión (c) vs “N” de SPT

Al igual que para el caso del ángulo de fricción interna, existen ecuaciones en la bibliografía que correlacionan el valor de SPT con la cohesión.

En el caso de la evaluación realizada en este proyecto, se han utilizado las siguientes correlaciones:

- **Shioi y Fukui (1982)**

Basados en las especificaciones de puentes viales de Japón, Shioi y Fukui plantearon la siguiente correlación entre **c** y **N** para suelos cohesivos:

$$c = 5.841 N \text{ (en kPa)}$$

- **Sowers (1979)**

Para arcillas de baja plasticidad y limos arcillosos, Sowers propuso la siguiente correlación:

$$c = 3.639 N \text{ (en kPa)}$$

- **Terzaghi y Peck (1967)**

Una correlación promedio para todas las arcillas fue desarrollada por Terzaghi y Peck, quienes propusieron la siguiente ecuación:

$$c = 6.320 N \text{ (en kPa)}$$

A partir de estas correlaciones, se obtuvieron valores de cohesión para cada uno de los ensayos de SPT realizados. Los resultados se muestran en el anexo C.

4.2.8. Correlación entre la resistencia a la compresión no drenada (q_u) del relleno vs “N” de SPT

Finalmente, una de las propiedades que se puede estimar a partir de los resultados de N de SPT es la de la resistencia a la compresión no drenada de un suelo cohesivo (q_u) desde la resistencia al corte no drenado de un suelo cohesivo (S_u), teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$S_u = 0.5q_u$$

Para este último parámetro, fueron empleadas las siguientes correlaciones:

Para valores de N corregido (N_1)

- **Sivrikaya y Togrol (2002)**

Para estimar el valor de la resistencia al corte no drenado, Sivrikaya y Trogol plantearon ecuaciones a partir de la plasticidad del suelo a evaluar. Para el caso de suelos de baja plasticidad, la correlación es la siguiente:

$$S_u = 4.93N_{60} \text{ (en kPa)}$$

- **Décourt (1990)**

Para arcillas en general, Décourt propone la siguiente ecuación de correlación:

$$S_u = 15N_{60} \text{ (en kPa)}$$

- **Hettiarachchi y Brown (2009)**

Una correlación generalizada para suelos finos fue planteada por Hettiarachchi y Brown, quienes propusieron la siguiente ecuación para estimar la resistencia al corte no drenado:

$$S_u = 4.1N_{60} \text{ (en kPa)}$$

Para valores de N sin corregir

- **Sanglerat (1972)**

Para arcillas limosas, Sanglerat propone la siguiente ecuación de correlación:

$$S_u = 10N \text{ (en kPa)}$$

- **Terzaghi y Peck (1967)**

Una correlación general para los suelos de grano fino fue desarrollada por Terzaghi y Peck, quienes propusieron la siguiente ecuación:

$$S_u = 6.25 N \text{ (en kPa)}$$

- **Sowers (1979)**

Para suelos de baja plasticidad, Sowers propuso la siguiente correlación:

$$S_u = 3.75 N \text{ (en kPa)}$$

A partir de estas correlaciones, se obtuvieron valores de resistencia a la compresión no drenada para cada uno de los ensayos de SPT realizados. Se debe tener en cuenta que las correlaciones están dadas para los valores de resistencia al corte no drenado (S_u). Para calcular la resistencia a la compresión (q_u), los valores obtenidos de S_u han sido duplicados, tal como indica la ecuación que relaciona ambos parámetros mostrada al inicio de esta sección. Los resultados se muestran en el anexo C.

4.2.9. Análisis de resultados de ensayos de campo

En los siguientes párrafos se analizan los ensayos de laboratorio para observar la correlación que pueda existir entre los tajeos rellenados, que se vienen investigando.

- **Análisis del ángulo de fricción vs antigüedad del relleno**

Tras la estimación de los ángulos de fricción para cada uno de los autores, se ha identificado que existe una variabilidad de +/- 5 grados y obteniendo valores

similares entre sí. En este contexto, se ha estimado un valor promedio de ángulo de fricción que represente al sondeo realizado en cada uno de los tajeos.

A continuación, se muestra la variabilidad del ángulo de fricción para diferentes profundidades de cada uno de los sondeos en los 5 tajeos ensayados:

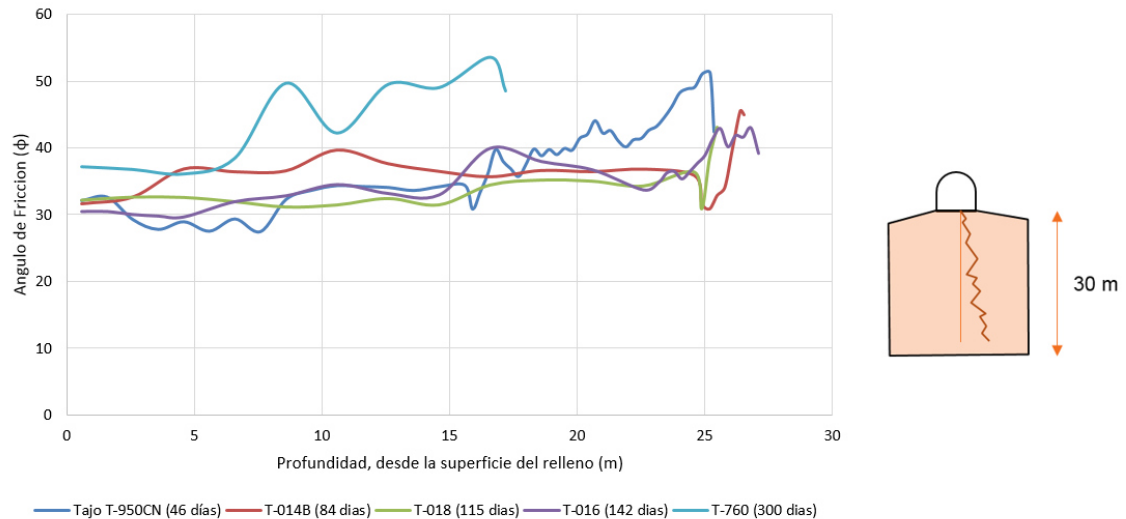


Figura 7. Correlación del ángulo de fricción insitu vs profundidad, para diferentes periodos de fraguado.

Los resultados indican que hay una leve y aparente disminución de resistencia del relleno entre los 46 y 142 días de fraguado. Asimismo, la resistencia a la fricción se muestra errática y con un ligero incremento a lo largo de la profundidad.

El tajo T-760, que tiene 300 días de fraguado, presenta un valor de resistencia elevado entre 5 a 15 grados con respecto a los otros ensayos realizados en los demás tajeos. Los mismos que son anómalos y podrían ser por el efecto de mayor contenido de cemento o reacción química.

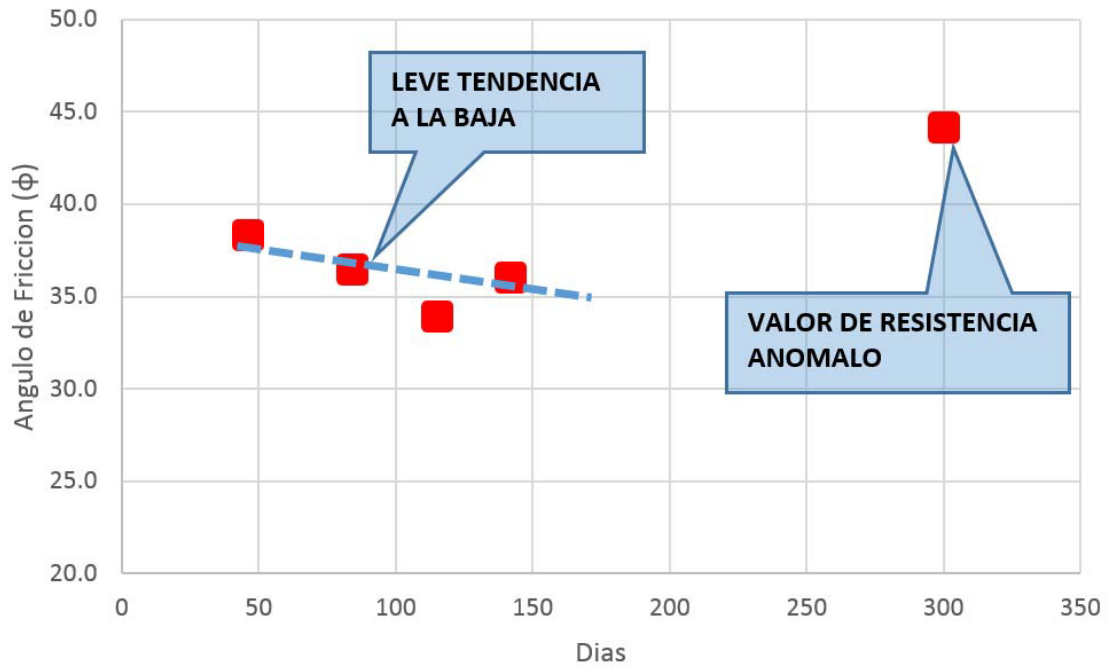


Figura 8. Valores promedio de ángulo de fricción insitu medido mediante ensayos SPT

- **Análisis de la cohesión vs antigüedad del relleno**

Tras la estimación la cohesión para cada uno de los autores se ha identificado que existe una variabilidad de +/- 50 kPa y obteniendo valores similares entre sí. En este contexto, se ha estimado un valor promedio de cohesión que represente al sondeo realizado en cada uno de los tajeos.

A continuación, se muestra la variabilidad de la cohesión para diferentes profundidades de cada uno de los sondeos en los 5 tajos ensayados:

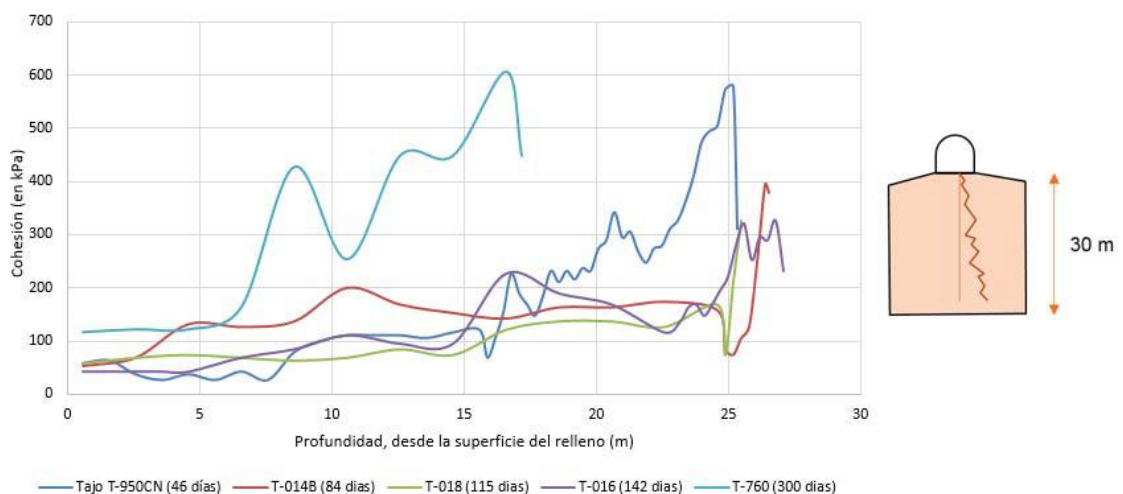


Figura 9. Correlación de la cohesión vs profundidad para diferentes periodos de fraguado

Los resultados indican que hay una leve y aparente disminución de la cohesión entre los 46 y 142 días de fraguado.

El tajo T-760, que tiene 300 días de fraguado, presenta un valor de cohesión elevado, de unos 150 kPa más con respecto a los otros ensayos realizados en los demás tajeos, valor anómalo y que podría ser por el efecto de mayor contenido de cemento o reacción química.



Figura 10. Análisis de la cohesión medida mediante ensayos SPT

- **Análisis de la resistencia la compresión no drenada vs antigüedad del terreno**

Tras la estimación la resistencia a la compresión no drenada para cada uno de los autores, se ha identificado que existe una variabilidad de +/- 150 kPa y valores similares entre sí. En este contexto, se ha estimado un valor promedio de resistencia al corte que represente al sondeo realizado en cada uno de los tajeos.

A continuación, se muestra la variabilidad de la cohesión para diferentes profundidades de cada uno de los sondeos en los 5 tajeos ensayados:

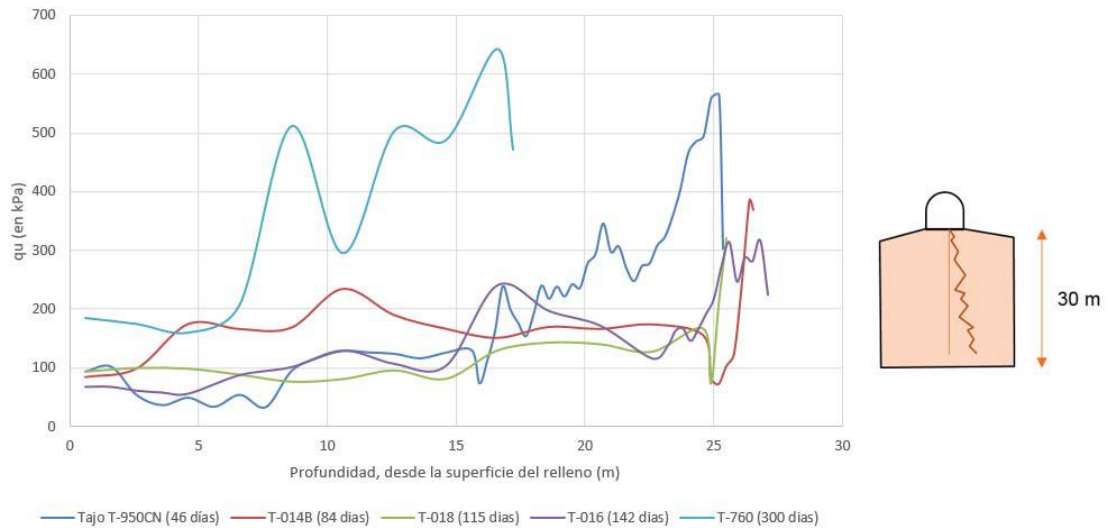


Figura 11. Correlación de la resistencia a la compresión no drenada vs profundidad, para diferentes periodos de fraguado

Los resultados indican que hay una leve y aparente disminución de la cohesión entre los 46 y 142 días de fraguado. El tajo T-760, que tiene 300 días de fraguado, presenta un valor de resistencia elevado, de unos 300 kPa más con respecto a los otros ensayos realizados en los demás tajeos, valor anómalo y que podría ser por el efecto de mayor contenido de cemento o reacción química.

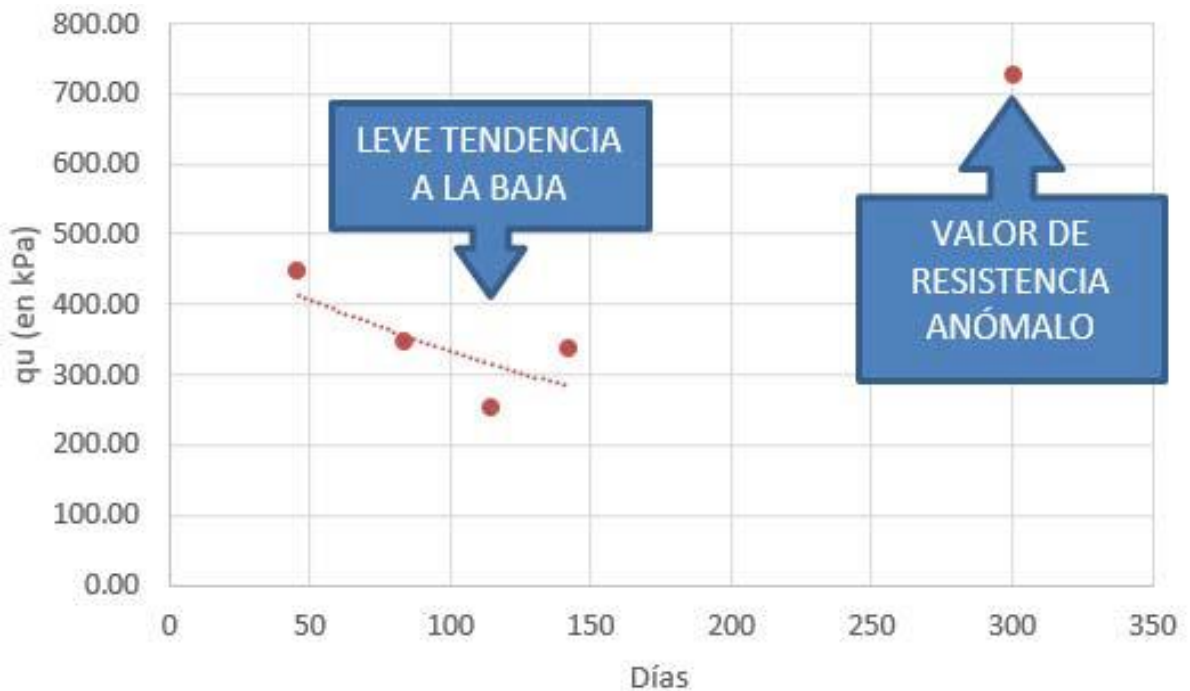


Figura 12. Análisis de la resistencia a la compresión no drenada medida mediante ensayos SPT.

Los resultados de los parámetros de resistencia insitu del relleno cementado correlacionado a partir de los ensayos SPT, indican que el ángulo de fricción, resistencia a la cohesión y resistencia a la compresión simple; hay un leve incremento con respecto a la altura del tajeo y la resistencia vs. el tiempo de fraguado no muestra una homogeneidad. Asimismo, a partir de los 46 a 142 días de fraguado, la resistencia del relleno muestra un leve descenso.

- **Análisis de la densidad medida *insitu* vs antigüedad del relleno**

En la figura siguiente se puede apreciar que la variación de la densidad en el tiempo en nula y la humedad tiene un ligero descenso en el tiempo. Asimismo, se puede resaltar que los valores de humedad *insitu* encontrados en los tajeos son bajos.

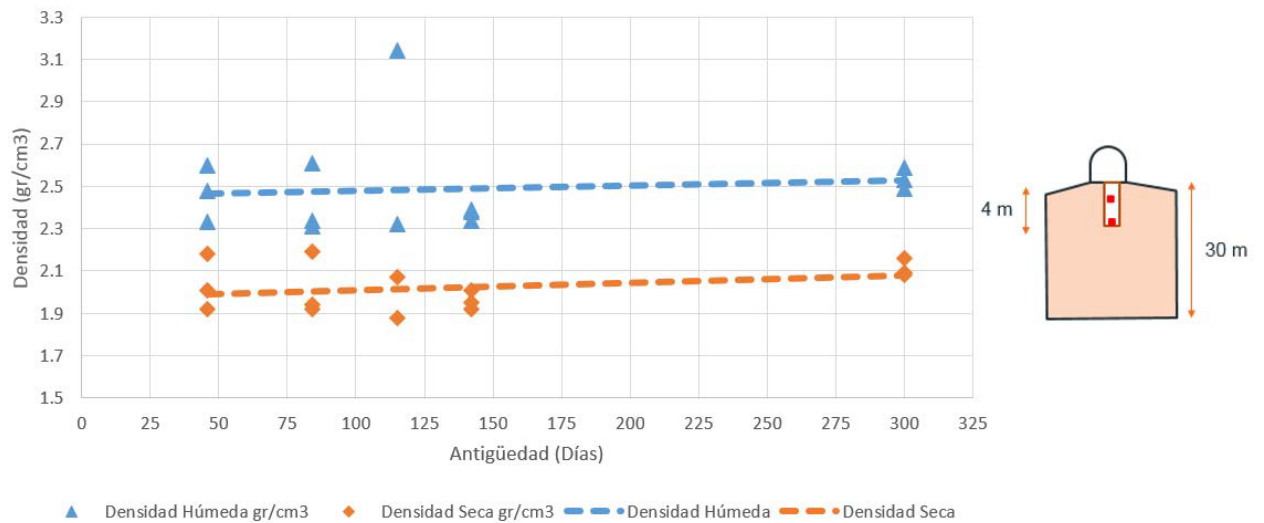


Figura 13. Análisis de la variabilidad de la densidad del relleno con relación al tiempo de fraguado

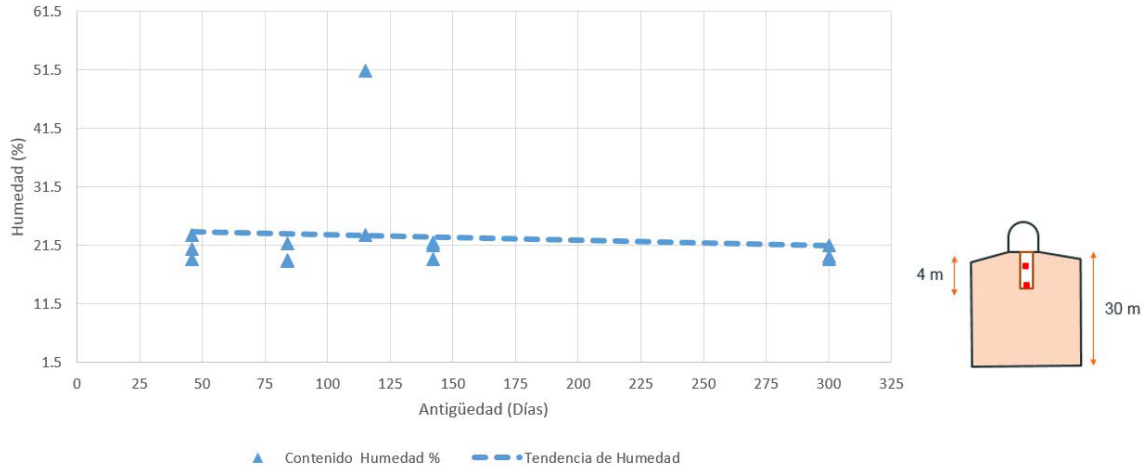


Figura 14. Análisis de la variabilidad de la humedad del relleno con relación al tiempo de fraguado

4.2.10. Ensayos de laboratorio

a) Propiedades físicas

En el laboratorio se verificó la clasificación visual de todas las muestras obtenidas y a fin de obtener las propiedades físicas del relleno, se ejecutaron con ellas los siguientes ensayos:

- ✓ Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422)
- ✓ Límites de Atterberg (ASTM D-4318)
- ✓ Contenido de humedad (ASTM D-2216)
- ✓ Peso específico de sólidos (ASTM D-854)

Luego de realizados los ensayos de laboratorio, se procedió a comparar sus resultados con las características estimadas en el campo, efectuándose las compatibilizaciones correspondientes en los casos en que fue necesario. En el anexo B se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio.

b) Ensayo de compresión no confinada

Como parte de los ensayos realizados para la evaluación de la resistencia del relleno, se realizaron ensayos de compresión simple o compresión no confinada (ASTM D-2166) en muestras inalteradas de relleno. Para la ejecución de este ensayo, se tallaron muestras cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura a partir de las muestras inalteradas obtenidas de los trabajos de investigación en campo. Estos cilindros fueron ensayados aplicando deformaciones a una velocidad controlada de 0.7 mm/min (0.7% de deformación/min).

El ensayo se realiza hasta que el valor de esfuerzo aplicado empieza a disminuir ante el aumento de deformación o hasta alcanzar un 15 % de deformación en la muestra cilíndrica. En este punto se obtiene el valor de resistencia a la compresión no confinada que es el valor del esfuerzo generado a partir de esa deformación máxima.

Los resultados obtenidos por el Cismid en la evaluación de los ensayos se muestran en el anexo B. Además de ello, la tabla N°8 muestra un resumen con los resultados de la resistencia a la compresión no confinada que obtenida en estos ensayos para cada uno de los especímenes.

Tabla 7. Resumen de las resistencias a la compresión no confinada q_u obtenidas en los ensayos de compresión simple

N°	Tajo	Muestra	Especimen	q_u (kg/cm ²)	q_u (Pa)
1	08 (*)	M-4	01	0.86	84.4
2		Ventana	02	1.44	141.3
3		M-2	01	3.26	319.9
4		Calicata	02	3.26	319.9
5	14	M-4	01	1.63	159.9
6		Ventana	02	2.02	198.2
7		M-2	01	2.40	235.5
8		Calicata	02	2.64	259.0
9	16	M-3	01	3.31	324.8
10		Ventana	02	3.60	253.2
11		M-1	01	1.49	146.2
12		Calicata	02	1.2	117.7
13	18	M-3	01	3.26	319.9
14		Ventana	02	3.55	348.3
15		M-1	01	3.41	334.6
16		Calicata	02	3.84	386.6
17	760	M-3	01	2.83	277.7
18		Ventana	02	4.03	395.4
19		M-2	01	1.15	112.8
20		Calicata	02	1.30	127.6
21	950	M-3	01	1.78	174.7
22		Ventana	02	1.63	159.9

Tomado de SRK, 2016 (*) Muestra sin cemento

c) Ensayo triaxial no consolidado – no drenado (UU)

Se llevaron a cabo 8 ensayos triaxiales no consolidados - no drenados (UU) (ASTM D-2850). En este tipo de ensayo, el espécimen inalterado de suelo es colocado en una celda de presión triaxial, en la que es sometida a una presión de confinamiento inicial σ_3 y posteriormente a un incremento en la carga axial que produce un esfuerzo desviador $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ y por ende una deformación en la muestra.

En un ensayo del tipo UU no se permite el drenaje ni durante la aplicación de la presión de confinamiento ni durante la aplicación del esfuerzo desviador, razón por la cual no existe disipación de la presión de poros durante el ensayo. A partir de estos ensayos, es posible obtener curvas de esfuerzo-deformación que permitan determinar los valores de los parámetros de resistencia del relleno. En este estudio, se realizaron ensayos triaxiales no consolidados – no drenados (UU) en 08 muestras inalteradas de relleno, a presiones de confinamiento iniciales σ_3 de 2, 4 y 8 kg/cm² en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos por el Cismid en la evaluación de los ensayos se muestran en el anexo B. En la tabla N°9 se presenta un resumen de los mismos.

Tabla 8. Resumen de resultados del ensayo triaxial UU

N°	Tajo	Muestra	σ_3 (kg/cm ²)	$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ (kg/cm ²)
1			2	4.46
2	08	M-3	4	5.95
3			8	6.86
4			2	5.86
5	14	M-1	4	6.53
6			8	7.60
7			2	4.80
8		M-1	4	7.20
9			8	10.66
10	16		2	7.17
11		M-4	4	7.58
12			8	8.30
13			2	8.06
14	18	M-1	4	14.78
15			8	23.66
16			2	10.42
17		M-2	4	13.49
18			8	22.42
19	760	M-4	2	1.93
20			4	3.84
21			8	7.73
22			2	6.00
23	950	M-1	4	6.82
24			8	8.59

d) Ensayo de corte directo

Un ensayo rápido y común que permite obtener propiedades de resistencia de un suelo es el ensayo de corte directo (ASTM D-3080). Este ensayo consiste en aplicar esfuerzos normales n y de corte r en un determinado espécimen y, a partir de la relación entre estos dos valores, obtener los parámetros de resistencia del material.

Para este proyecto, se realizaron ensayos de corte directo en 02 muestras inalteradas de relleno, con valores de esfuerzo normal de 1, 2 y 4 kg/cm² en cada una de ellas. Los resultados obtenidos por el Cismid en la evaluación de los ensayos se muestran en el anexo B. En la tabla N°10 se presenta un resumen de los mismos.

Tabla 9. Resumen de resultados del ensayo de corte directo

N°	Tajo	Muestra	σ (kg/cm ²)	τ máx. (kg/cm ²)
1			1	0.935
2	08	M-4	2	1.521
3			4	2.472
4			1	1.002
5	14	M-4	2	1.686
6			4	2.479

e) Ensayo de permeabilidad

Este método de ensayo cubre las mediciones de laboratorio de la conductividad hidráulica (también referida como coeficiente de permeabilidad) de materiales porosos saturados en agua con un permeámetro de pared flexible. Este método de ensayo puede utilizarse con muestras inalteradas o remoldeadas (compactadas), que tienen una conductividad hidráulica menor o igual que 1x10⁻⁵ m/s (1x10⁻³ cm/s).

El resumen del cálculo de la constante de la conductividad hidráulica, se presenta en el siguiente resumen, para mayor detalle ver el anexo B.

Tabla 10. Resumen de resultados del ensayo de permeabilidad

Tajo	Muestra	K (T20°C) (cm/seg)
14	M-2	0.00002
16	M-2	0.0000157
16	M-4	0.0000121
950	M-4	0.0000126

4.2.11. Análisis de resultados de ensayos de laboratorio

a) Análisis de la cohesión y fricción en función al tiempo

Los ensayos triaxiales y de corte directo de laboratorio de geotecnia, entregaron valores de cohesión con una tendencia leve al descenso y a la vez bastante errática. Los valores de ángulo de fricción, también se muestran erráticos y muestran un leve ascenso con el incremento del tiempo de fraguado.

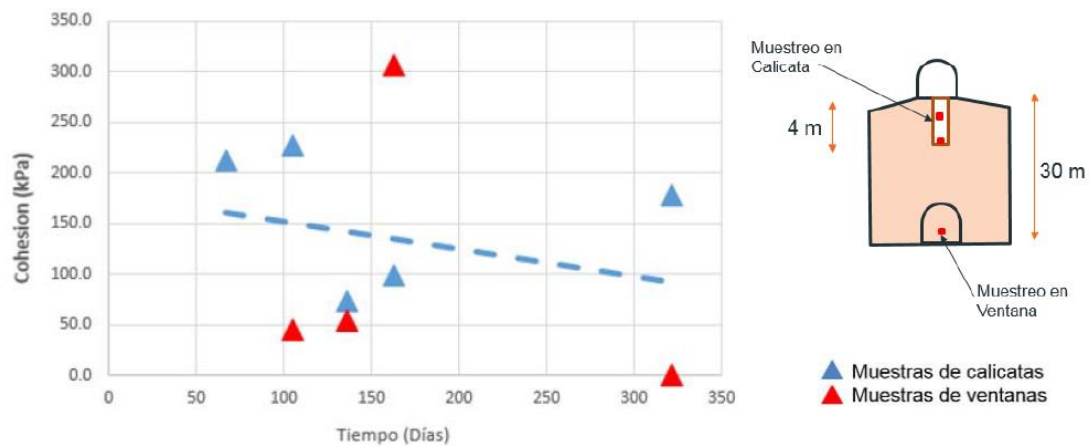


Figura 15. Análisis de la variabilidad de la cohesión con respecto al tiempo

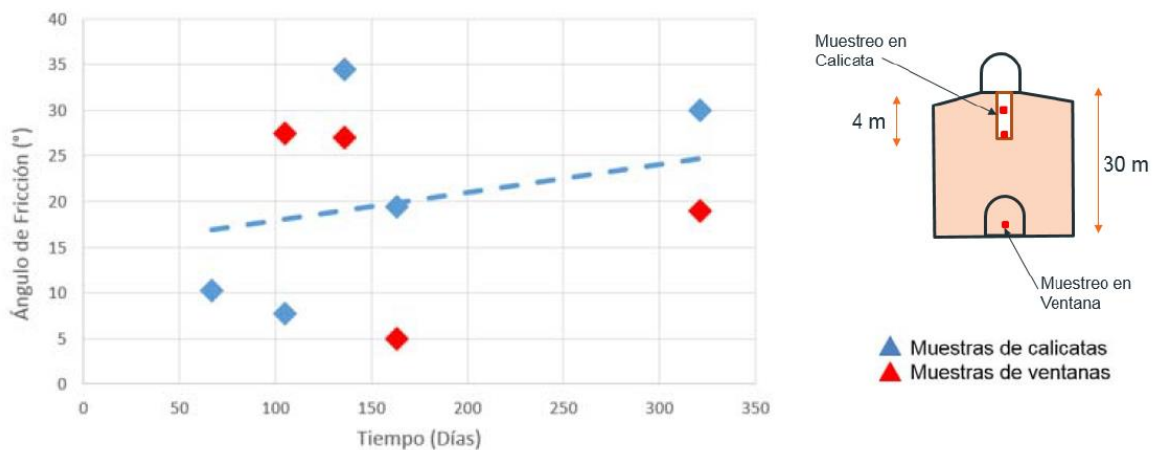


Figura 16. Análisis de la variabilidad del ángulo de fricción con respecto al tiempo

Considerando todos los parámetros de ensayos triaxiales, para un análisis global de la resistencia, se determinó un ángulo de fricción promedio de 22° ($\pm 8^{\circ}$) y resistencia a la cohesión promedio de 103 kPa (± 50), lo mismos que podrían ser representativos para tiempos de fraguado mayores a 60 días.

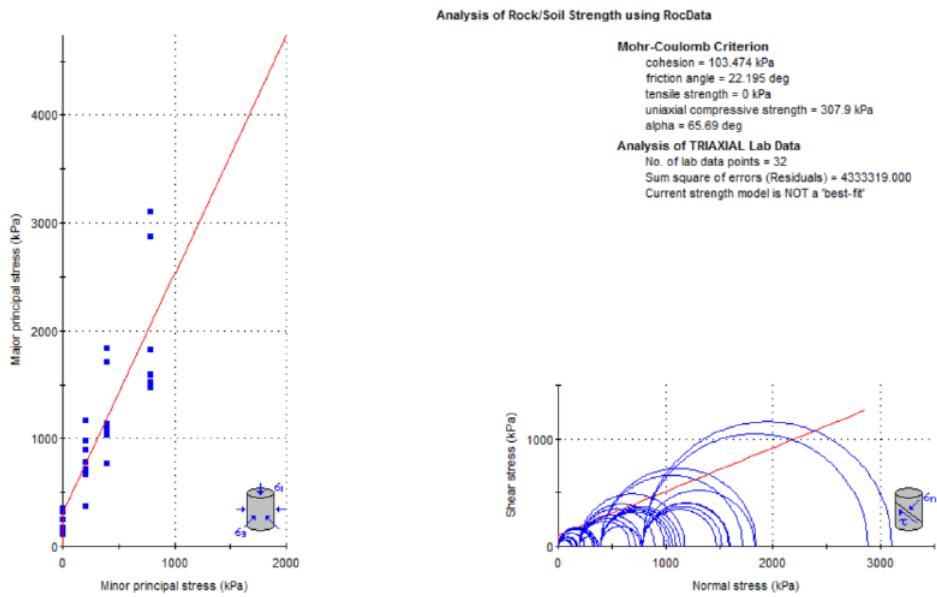


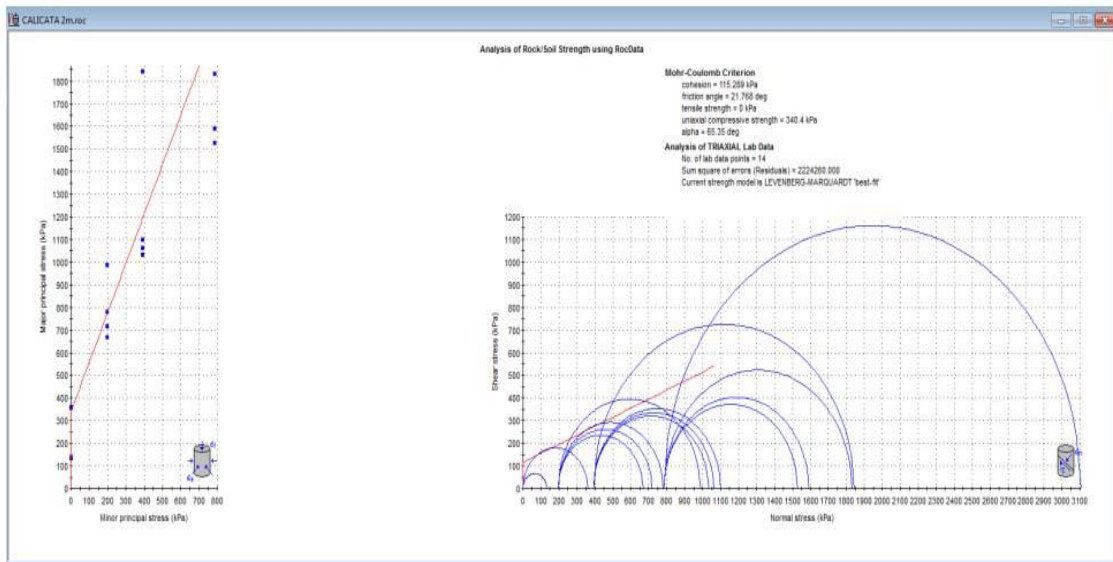
Figura 17. Estimación de la cohesión y ángulo de fricción del relleno global considerando los 5 tajeos analizados

Asimismo, al hacer una diferenciación de los ángulos de fricción y cohesión con respecto a la ubicación de la muestra se obtuvo

Muestra a 2 m de profundidad de calicata

Ángulo de fricción: 21.7°

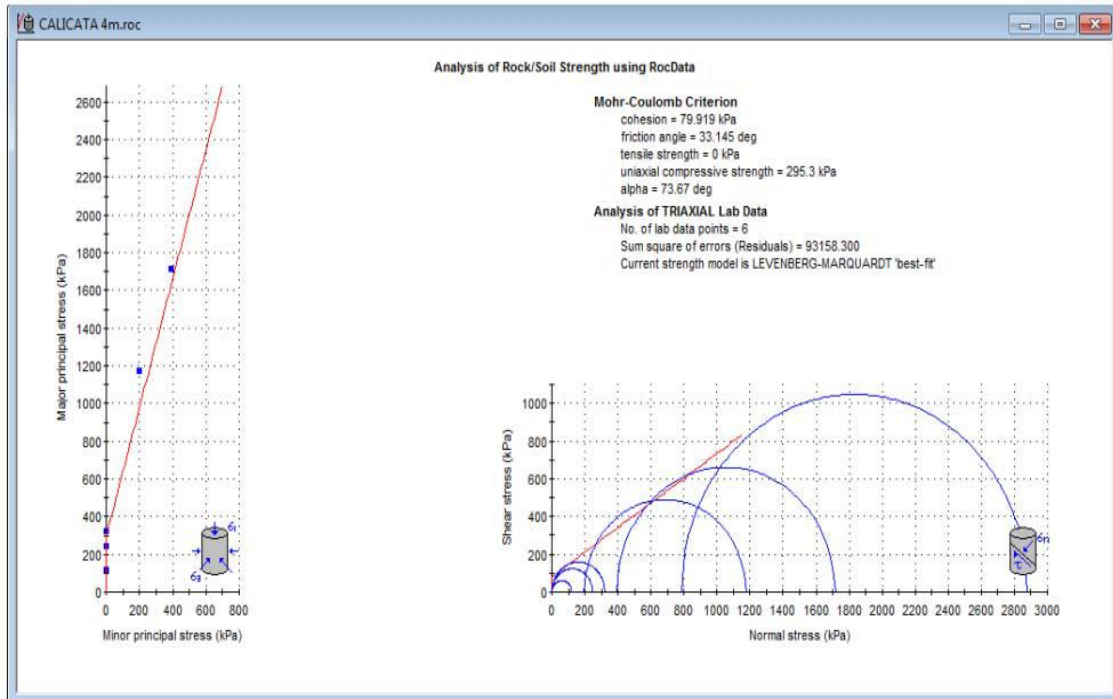
Cohesión (kPa): 115



Muestra a 4 m de profundidad de calicata

Ángulo de fricción: 33.1°

Cohesión (kPa): 80



Muestra en la ventana inferior del tajeo (29 m profundidad) <

Ángulo de fricción: 13.7°

Cohesión (kPa): 113

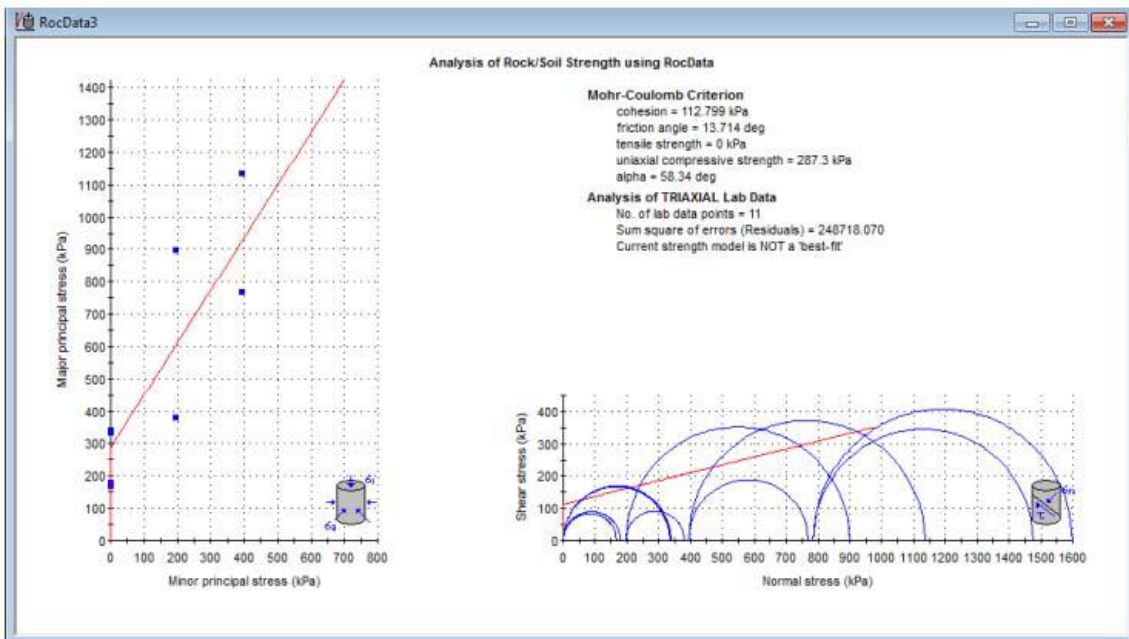


Figura 18. Estimación de la cohesión y ángulo de fricción del relleno global considerando la ubicación del muestreo de los tajeos analizados

Tras el análisis de los ensayos triaxiales, se puede concluir que la resistencia a la cohesión promedio es de (+/- 30) 103 kPa y ángulo de fricción promedio de (+/- 10) 22°. Asimismo, se aprecia una sensibilidad de la resistencia que podría obedecer a factores químicos, operativos y dosificación de mezcla.

Comparando los resultados de ensayos triaxiales con las correlaciones obtenidas con los ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos.

b) Análisis de la resistencia de la compresión unidireccional no confinada

En la figura siguiente se han planteado los resultados de la resistencia a la compresión uniaxial no confinada de los tajeos 950-OB2, 014-OB5B, 018-OB5, 016-OB5B, 760-OB6. Se observa que los resultados son erráticos tanto de las muestras extraídas en las ventanas inferiores como en las calicatas, lo que hace deducir que hay un leve incremento de la resistencia en el tiempo y los valores de resistencia tienen un amplio rango de variabilidad.

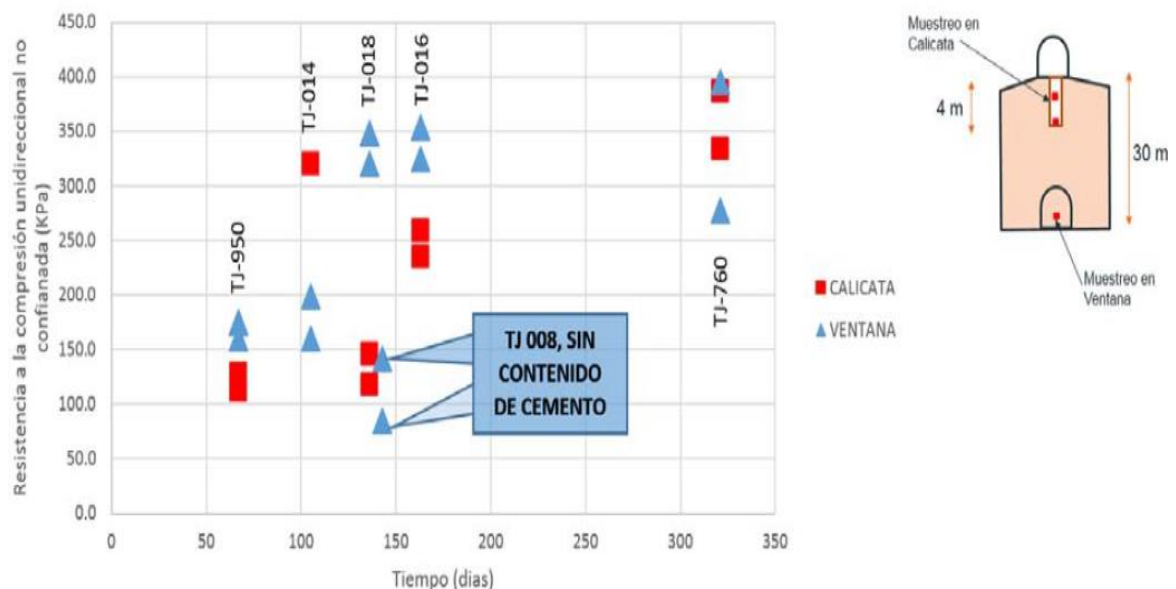


Figura 19. Análisis de la variabilidad de la resistencia a la compresión unidireccional con respecto al tiempo, estimados en la zona superior del tajeo (rojo) y la ventana (azul)

Tras el análisis de los ensayos de resistencia a la compresión simple, se estimó un promedio de 247 kPa con una variación de la sensibilidad de +/- 150 kPa.

Comparando los resultados de ensayos de compresión simple con las correlaciones obtenidas con los ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos.

4.3. Evaluación de la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas de relleno

4.3.1. Comparación de la resistencia obtenida en laboratorio de Cerro Lindo vs laboratorio Cismid

Los tajeos investigados por SRK y mencionados anteriormente, también han sido investigados por Cerro Lindo, estos se encuentran en la base de datos con registros de ensayos de resistencia de compresión no confinada entregados por el cliente, con distintas fechas de muestreo, en donde podemos observar la evolución de la resistencia en función a su edad en días. De esta manera se han analizado las curvas de resistencia de los 5 tajeos (TJ-950-OB2, TJ-014-OB5B, TJ-018-OB5, TJ-016-OB5B, TJ-760-OB6) y fueron comparados con los valores de resistencia obtenidos en el laboratorio de Cismid. Tajo 950-OB2, en este tajeo según el reporte de los ensayos de resistencia de Cerro Lindo, se ha encontrado 3 fechas de muestreo, con 8 muestras en cada fecha, éstas fueron ensayadas nominalmente a 7; 14; 30 y 60 días de edad. Del cual podemos observar una tendencia creciente desde la fecha de rellenado, concluyéndose que la resistencia más favorable se muestra desde la edad de 15 a 40 días.

El resultado del ensayo de compresión no confinada realizado en el laboratorio geotécnico de Cismid, muestra un valor de resistencia considerablemente inferior.

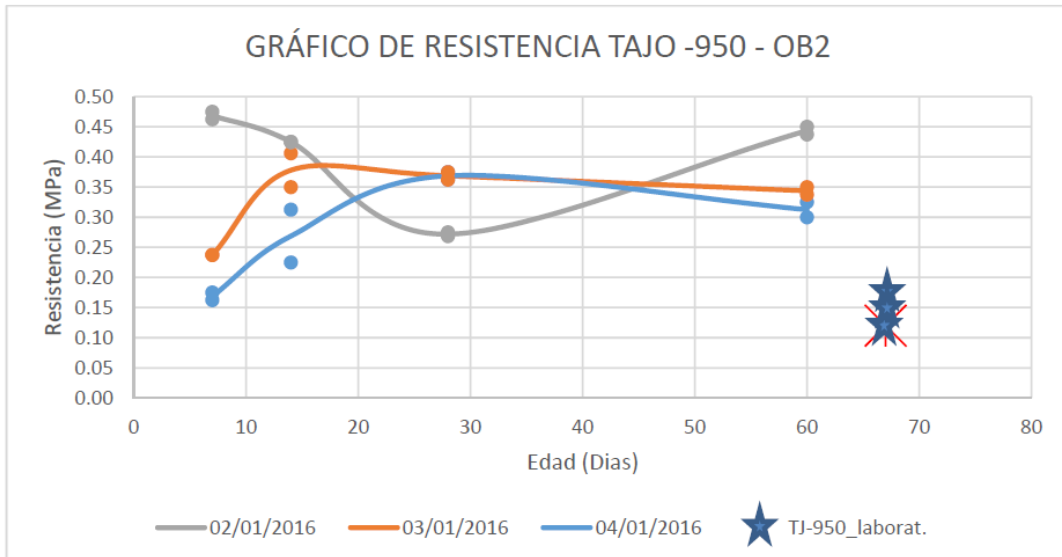


Figura 20. Variabilidad de la resistencia en el tajo 950-OB2, en tres etapas de muestreo Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

Tajo 016-OB5B, en este tajeo se tienen registros de 6 fechas de muestreo por parte de Cerro Lindo, con 72 muestras en total, éstas fueron ensayadas nominalmente a 7; 14; 30; 60; 90; 120; 150 días de edad. En la curva graficada en la siguiente figura podemos observar una curva sinusoidal, concluyéndose que la resistencia más favorable se obtiene desde los 15 a 40 días, además se observa que podría mejorar luego de los 3 meses. El ensayo de laboratorio geotécnico del Cismid, nos muestra el resultado de la resistencia ligeramente inferior al de la curva.

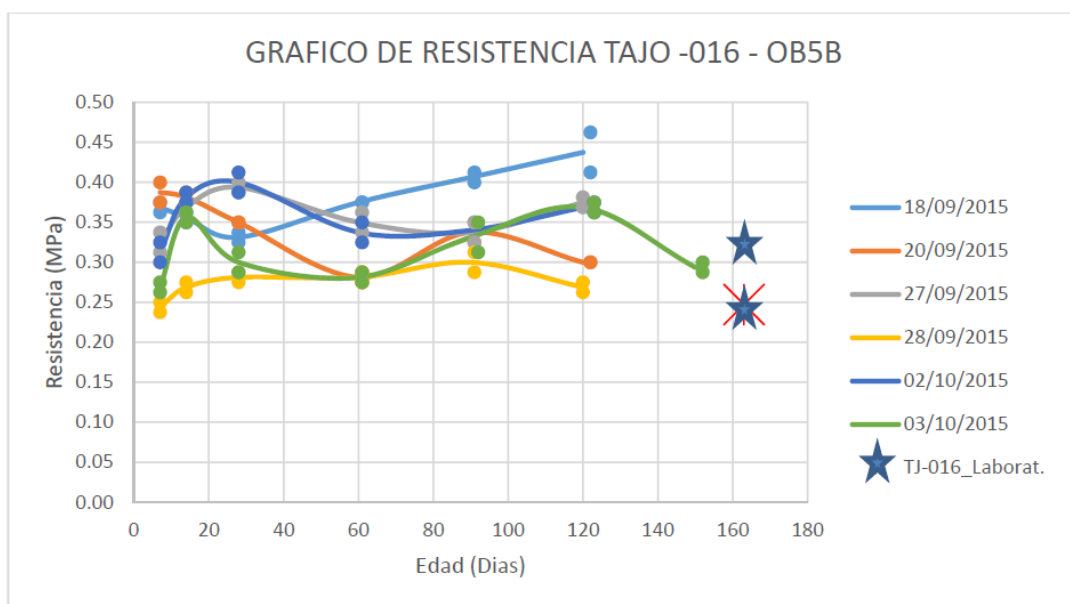


Figura 21. Variabilidad de la resistencia en el tajo 016-OB5B, en 6 etapas de muestreo Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

Tajo 014BN-OB5B, en este tajeo hay 3 fechas de muestreo en el registro de Milpo Cerro Lindo, se ha encontrado 3 fechas de muestreo, con 30 muestras en total, éstas fueron ensayadas nominalmente a 7; 14; 30; 60 y 90 días de edad.

En la curva graficada en la siguiente figura podemos observar una curva con una tendencia muy marcada, concluyéndose que la resistencia más favorable se obtiene desde los 15 a 30 días, luego de los 50 días, se observa que la resistencia tiende a ser constante con 300Kpa. El ensayo de laboratorio geotécnico confirma la tendencia constante a los 105 días de relleno.

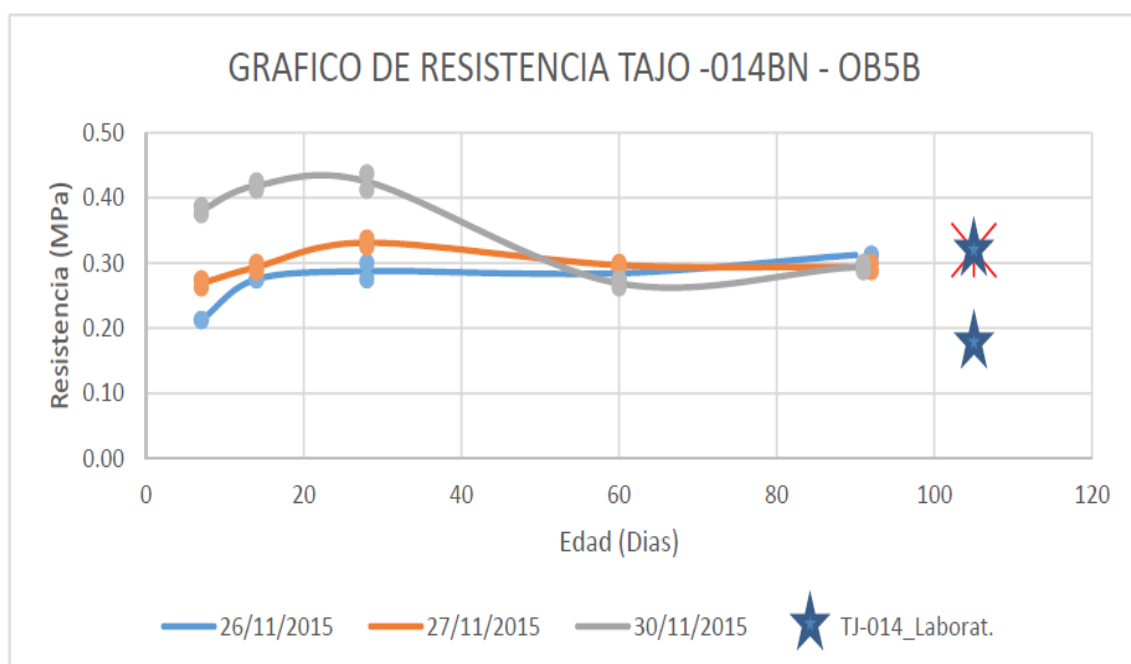


Figura 22. Variabilidad de la resistencia en el tajo 014BN-OB5B, en 3 etapas de muestreo Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

Tajo 750-OB6, en este tajeo se encontró hasta 5 fechas de muestreo en el registro de Milpo Cerro Lindo, con 30 muestras en total, éstas fueron ensayadas nominalmente a 7; 14 y 28 días de edad. En la curva graficada de la siguiente figura podemos observar una curva ascendente, no se logró observar en las fechas posteriores por falta de datos, sin embargo, podemos observar el dato del ensayo de laboratorio, la que nos muestra la tendencia de la resistencia uniforme.

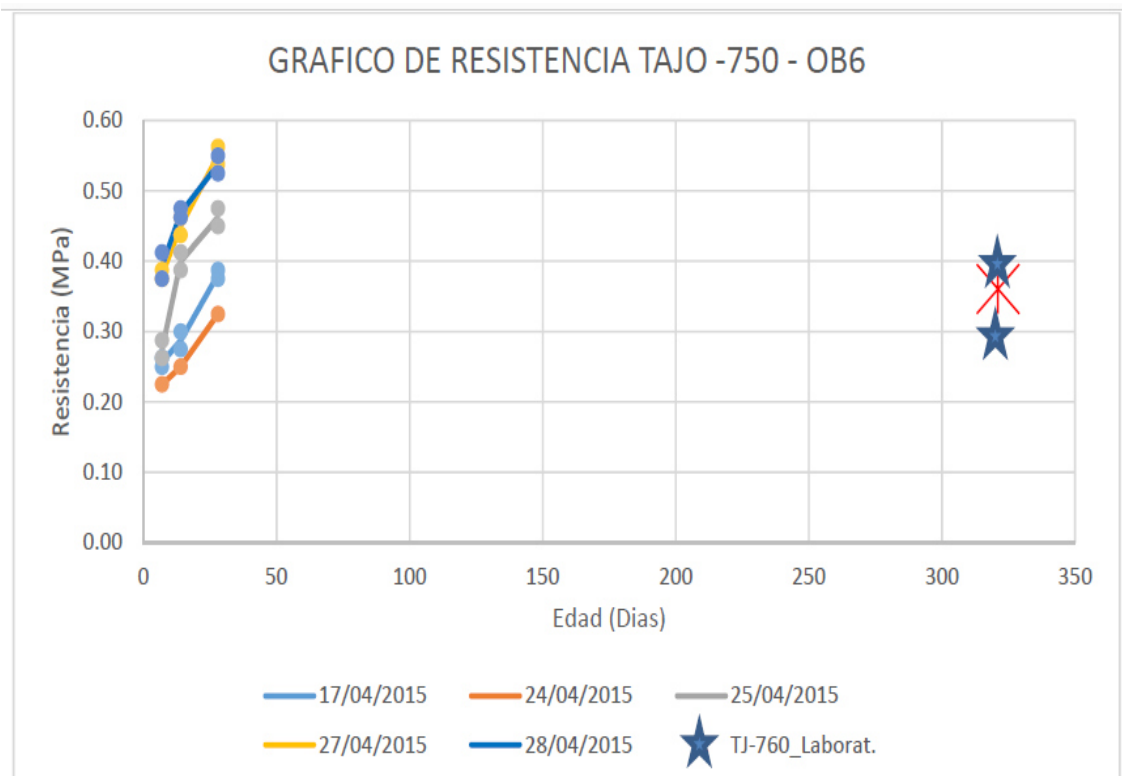


Figura 23. Variabilidad de la resistencia en el tajo 750-OB6, en 5 etapas de muestreo Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

Tajo 018-OB5, en este tajeo hay 3 fechas de muestreo en el registro de Milpo Cerro Lindo, se ha encontrado 3 fechas de muestreo, con 30 muestras en total, éstas fueron ensayadas nominalmente a 7; 14; 28; 60; 90; 120 y 150 días de edad. El resultado de dichos ensayos muestra una curva sinusoidal con una tendencia creciente en la primera etapa (de 0 a 15 días), posterior a los 15 días muestra una caída clara de su resistencia, volviendo a recuperarse después de los 30 días, comparado con los demás tajeos, éste es un caso atípico, ya que en el rango de edad donde la resistencia es más alta (alrededor de 30 días), en este caso tenemos la más baja; donde la resistencia óptima se trasladaría entre el rango de 50 a 65 días aproximadamente. Por otro lado, el resultado de laboratorio estimado en el Cismid muestra un valor de resistencia considerablemente inferior.

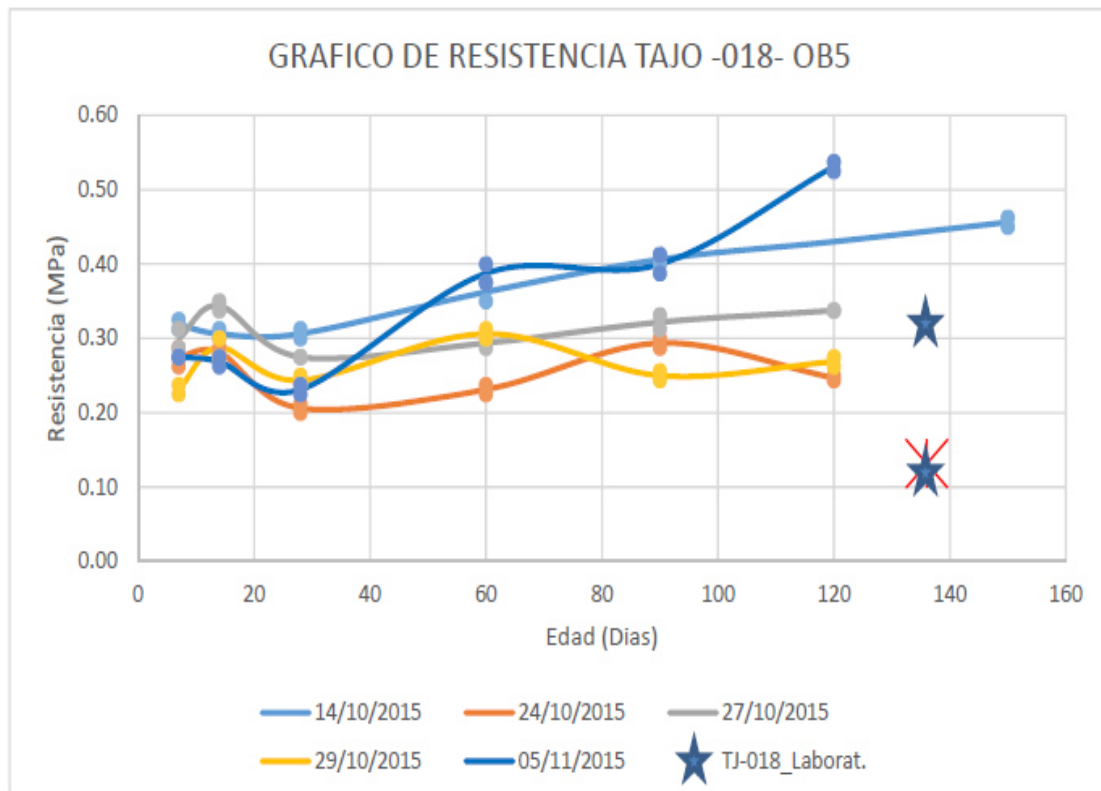


Figura 24. Variabilidad de la resistencia en el tajo 018-OB5, en 5 etapas de muestreo Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

Tras la comparación de los resultados de laboratorio realizados por Cerro Lindo vs los resultados de laboratorio realizado por el Cismid, se concluye que la resistencia *insitu* del relleno cementado es relativamente inferior al estimado por el laboratorio de Cismid.

4.4. Revisión de base de datos de resistencia de relleno realizado por Cerro Lindo

Tras la revisión de la resistencia del relleno a lo largo de los años 2015 y 2016, realizado con edades desde 7 hasta 120 días de fraguado, donde se estimó que la resistencia del relleno está en el orden de 200 a 400 kPa. Asimismo, se ha identificado que la evolución de la resistencia vs el tiempo de fraguado tiene un incremento de la resistencia en los primeros 20 a 40 días, posteriormente presenta un leve descenso de la resistencia. También, se identificó que las pruebas realizadas a partir de mediados del 2015 hasta la fecha, se ha manifestado una evolución de resistencia más uniforme.

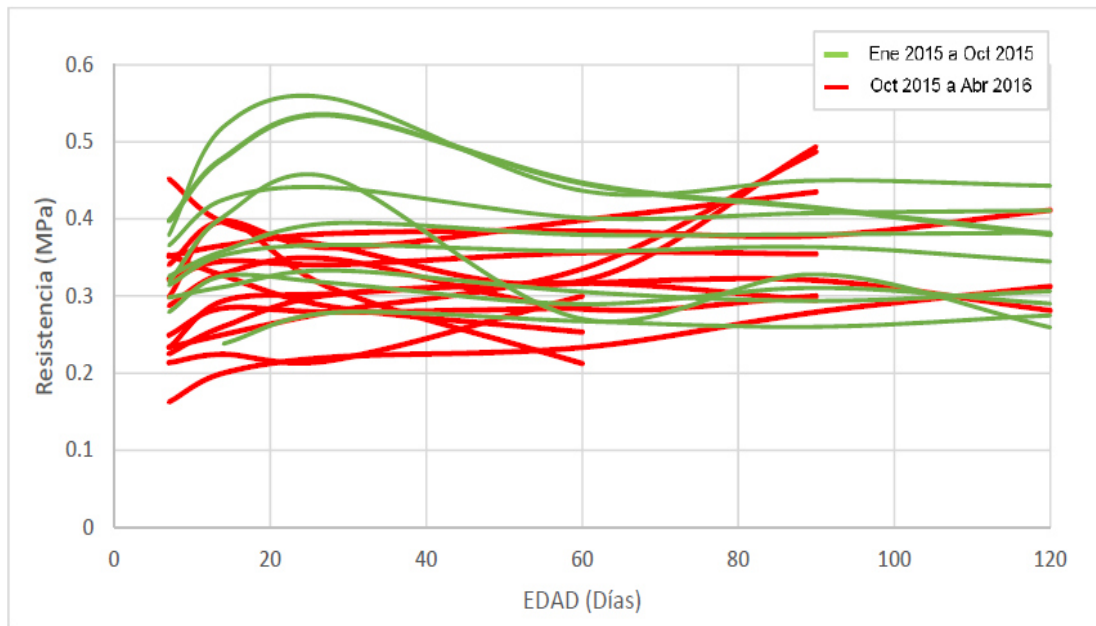


Figura 25. Evolución de la resistencia del relleno vs el tiempo de fraguado Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

4.4.1. Revisión de base de datos de granulometría del relave producido por Cerro Lindo

Tras la revisión de la granulometría del relave producido por Cerro Lindo, se ha identificado que este actualmente está en el rango de 33 a 43% por debajo de la malla N° 200 (74 micras). Asimismo, en la historia de granulometría desde el 2011, se evidencia una amplia sensibilidad granulométrica que podría afectar a la resistencia del relleno cementado.

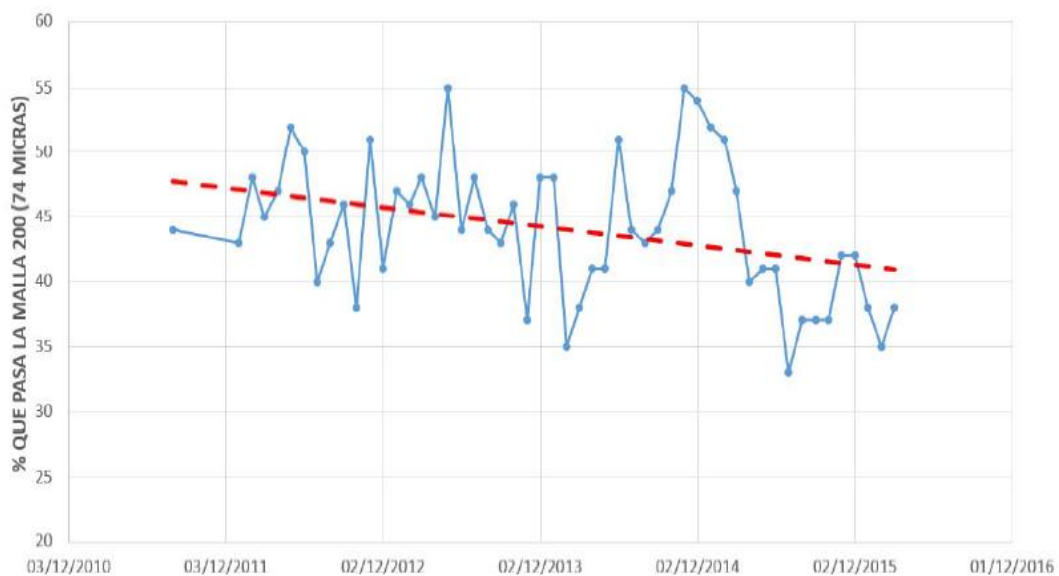


Figura 26. Evolución de la resistencia del relleno vs el tiempo de fraguado Tomado de SRK 2016, base de datos de Cerro Lindo

4.4.2. Back análisis de la estabilidad en tajeos fallados

Las fallas por resistencia del relleno, forman superficies semi circulares o en forma de una cuchara, a las que se les ha identificado observando la topografía levantada por Optech. Tras la revisión de todos los tajeos explotados en la mina Cerro Lindo, se ha identificado 14 casos donde ocurrió falla del relleno y en donde se podría simular un back análisis para estimar la resistencia del relleno que tuvo al momento de la falla.

Los criterios considerados para el back análisis de los taludes del relleno fueron los siguientes:

- ✓ Estimación de la resistencia de la cohesión considerando un factor de seguridad de 0.99 y un ángulo de fricción de 22°.
- ✓ Estimación de la resistencia a la fricción considerando un factor de seguridad de 0.99 y una cohesión de 103 kPa.
- ✓ Estimación del factor de seguridad considerando un ángulo de fricción de 22° y una cohesión de 103 kPa, estimado en las pruebas *insitu*.
- ✓ Para el back análisis se utilizó el método de equilibrio límite con el software Slide 6.0 de Rocscience, que considera la densidad, la geometría externa e interna de los taludes, considerando un factor de seguridad de 0.99. Asimismo, se ha estimado factores de seguridad para los parámetros de resistencia obtenidos en el laboratorio del Cismid.

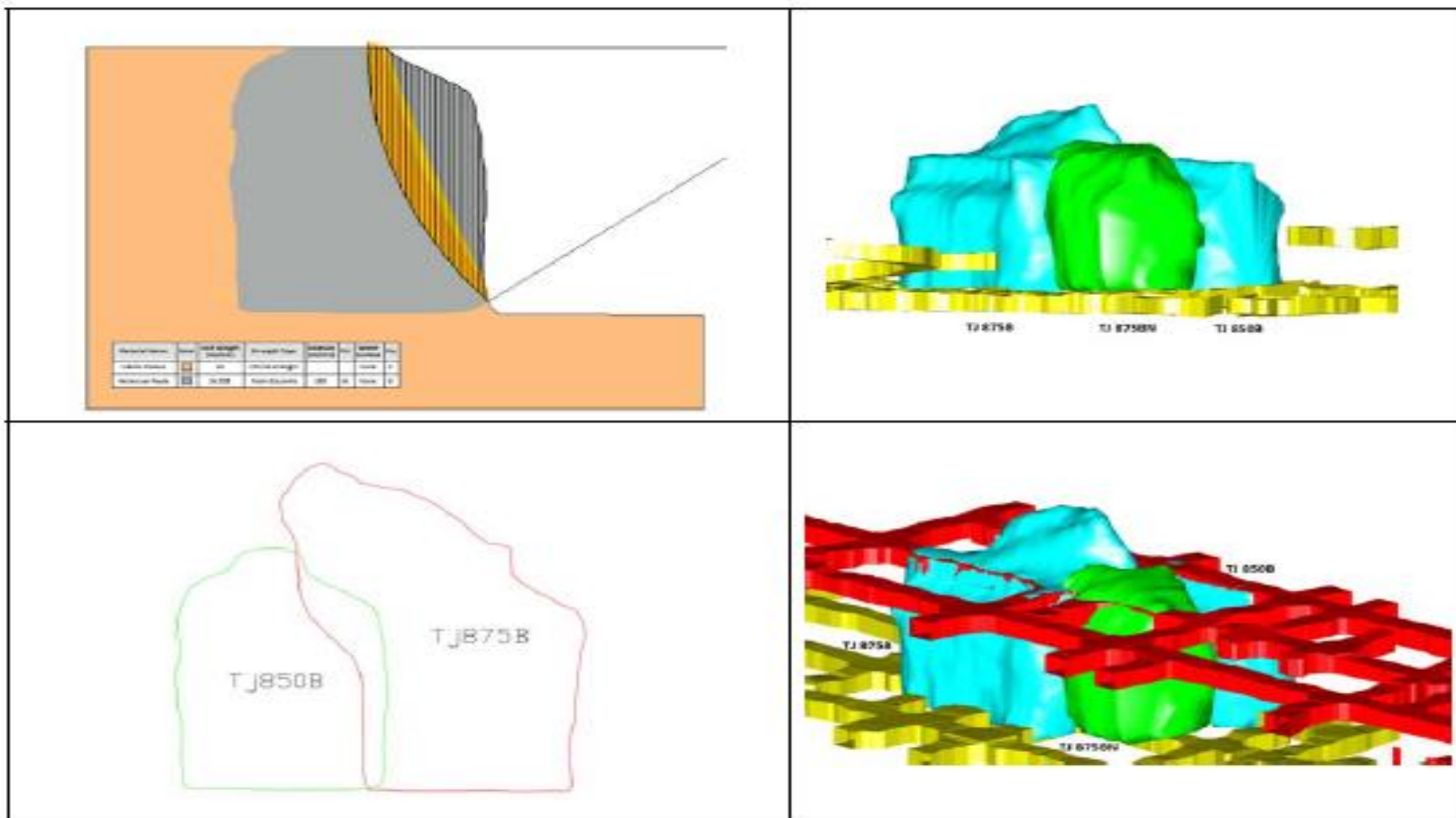


Figura 27. Esquema típico de back análisis de estabilidad en fallas ocurridas en los taludes de relleno cementado

Tabla 11. Resumen del back análisis en fallas de taludes de relleno cementado

N°	OB	Nv. Base	Nv. Superior	Tajo Primario	Tajo secundario	Prop. Lab. C=103KPa, n=22	FS=0.99 C=103KPa, n=Variable	FS=0.99 FI=22 C=Variable
1	OB1	1740	1770	T-010	T-001	0.785	37	142
2	OB5	1820	1850	T-012	T-013	0.848	36	126
3	B5B	1680	1710	T-012B	T-013B	1.139	10	88
4	OB5	1650	1680	T-016NE	T-017	0.951	28	108
5	OB5	1650	1680	T-018NE	T-017	0.968	25	106
6	OB1	1740	1770	T-021	T-001	0.929	28	112
7	OB2	1770	1800	T-180NW	T-160NW	1.001	20	102
8	OB2	1770	1800	T-180SE	T-160SE	0.387	5	126
9	OB2	1770	1800	T-220SE	T-200SE	0.632	50	163
10	OB2	1740	1770	T-850B	T-875B	0.861	34	124
11	OB6A	1820	1850	T-861	T-851	1.098	18	92
12	OB1	1770	1800	T-901	T-921	1.222	24	83
13	OB6B	1850	1880	T-901	T-891	1.195	13	82
14	OB2	1650	1680	T-925BN	T-950BN	1.593	-	58
Promedio						0.96	28	112

Los resultados de back análisis de fallas ocurridas en taludes de relleno cementado dan parámetros de resistencia muy similares al estimado en los ensayos triaxiales promedio estimado en laboratorio.

4.5. Dimensionamiento de los tajeos secundarios, en base a la resistencia calibrada del relleno

4.5.1. Método de Mitchell (1982)

Para el cálculo de las dimensiones óptimas del bloque de relleno, es necesario evaluar la estabilidad de este en diferentes configuraciones. Para ello, fue adoptado el método de análisis de estabilidad propuesto por Li, el cual es una generalización del método propuesto por Mitchell (1982).

El método de Mitchell, ampliamente usado en el diseño de rellenos en mina, señala que los problemas de deslizamiento de éstos ocurren cuando se presenta una altura tal que el bloque expuesto debido al tajeo tiene un peso suficientemente grande como para romper el equilibrio, por lo que una parte de la masa total se desprende invadiendo el espacio libre del tajeo. Esta falla se puede simplificar a una de tipo planar, donde las fuerzas actuantes corresponden a fuerzas gravitatorias y las fuerzas resistentes dependen de la cohesión y la fricción del material, tal y como se aprecia en las figuras N°25 y 26.

El factor de seguridad queda definido como sigue:

$$F.S. = \frac{F_{resistentes}}{F_{actuantes}} = \frac{\left(\frac{cLB}{\cos\psi} \right) + (LBH_e\gamma - 2cBH_e)(\cos\psi \cdot \tan\phi)}{(LBH_e\gamma - 2cBH_e) \cdot \sin\psi}$$

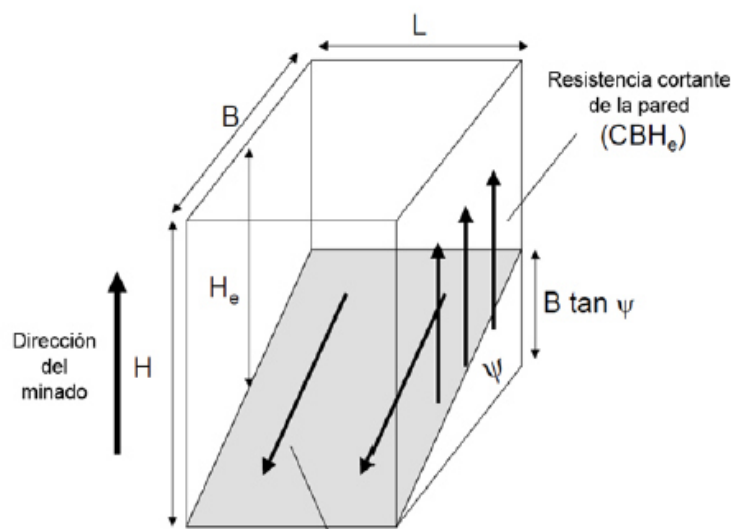


Figura 28. Falla por corte en el relleno (adaptado de Mine Backfill, Hassani & Archibald)

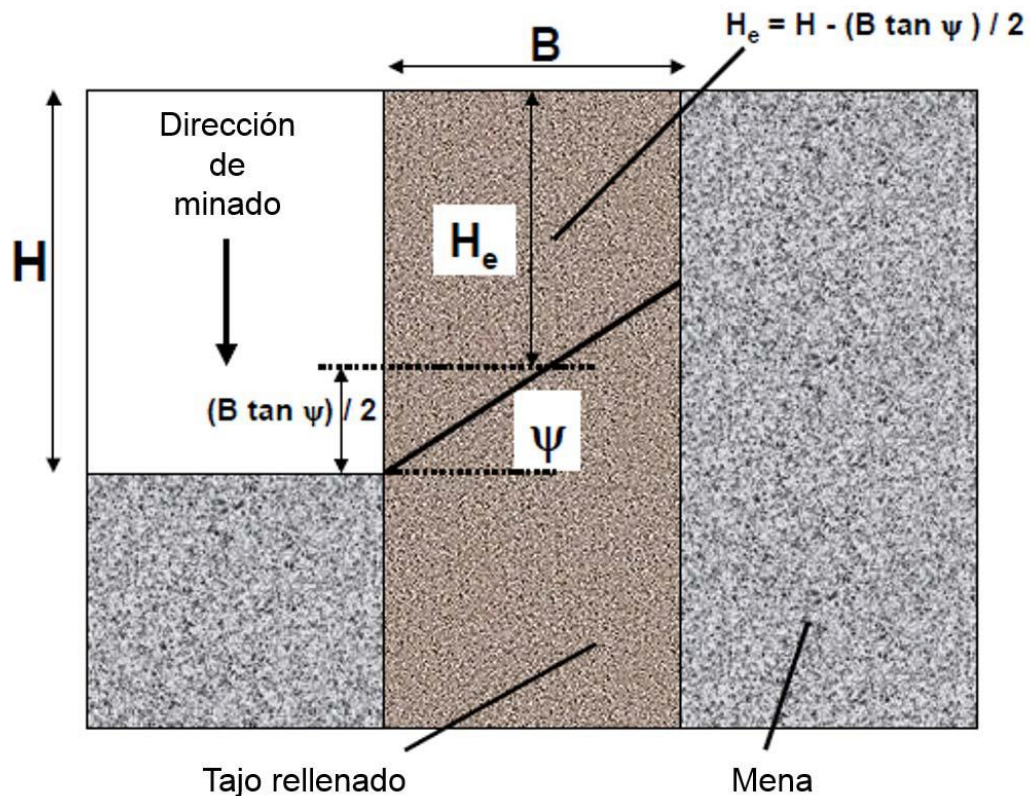


Figura 29. Perfil de la falla por corte en el relleno (adaptado de Mine Backfill, Hassani & Archibald)

A pesar de su amplia aceptación, el método de Mitchell presenta algunas limitaciones, que se presentan a continuación: la cohesión del interfaz relleno–paredes laterales es considerada de igual valor que la cohesión del relleno. (5)

Ensayos de corte directo en la interfaz mencionada realizados por Fall y Nasir (2010) muestran que el valor de cohesión de esta interfaz es solo una fracción de la cohesión del relleno, por lo que asumir que son iguales es poco conservador.

Dado que Mitchell asume $\phi = 0$, se ignora el valor de resistencia al corte por la componente de fricción del relleno. Según Thompson (2012), este supuesto solo sería válido en el caso de rellenos recién colocados, antes de la disipación de la presión de poros debido al peso propio del relleno, es decir, manteniendo al relleno en condiciones no consolidadas y no drenadas. Ensayos realizados a muestras de rellenos cementados (Veenstra et al. 2012, James et al. 2011) indicaron que tanto la cohesión como la fricción contribuyen a la resistencia cortante del relleno.

La resistencia al corte por fricción a lo largo del interfaz relleno–paredes laterales y la resistencia a la corte movilizada a lo largo de la pared posterior fueron depreciadas.

Ninguna carga superficial fue considerada en la parte superior del relleno, lo que lo hace poco conservador.

Una modificación de este método fue presentada por Li y Aubertin (2012), en el que la carga aplicada en la parte superior ya es considerada en el cálculo. Además de ello, en este método modificado, la cohesión en la interfaz pared lateral – relleno es una fracción de la cohesión del relleno. No obstante, esta solución aún presenta limitaciones debido a los supuestos que asume. Por ejemplo, se sigue sin considerar la resistencia cortante debido a la cohesión a lo largo de la interfaz entre el relleno y la pared posterior.

4.5.2. Método generalizado de Li (2014)

Por todo lo anterior, se plantea una solución generalizada, a fin de superar estas limitaciones. Considerando que el relleno obedece el criterio de Mohr-Coulomb, y despreciando el esfuerzo normal en la pared posterior, las resistencias al corte a lo largo de la pared posterior. (5)

Pueden ser expresadas como sigue:

la pared posterior, las resistencias al corte a lo largo de la pared posterior (τ_a) y las laterales (τ_s) pueden ser expresadas como sigue:

$$\tau_a = c_a$$

$$\tau_s = c_s + \sigma_h \tan \delta$$

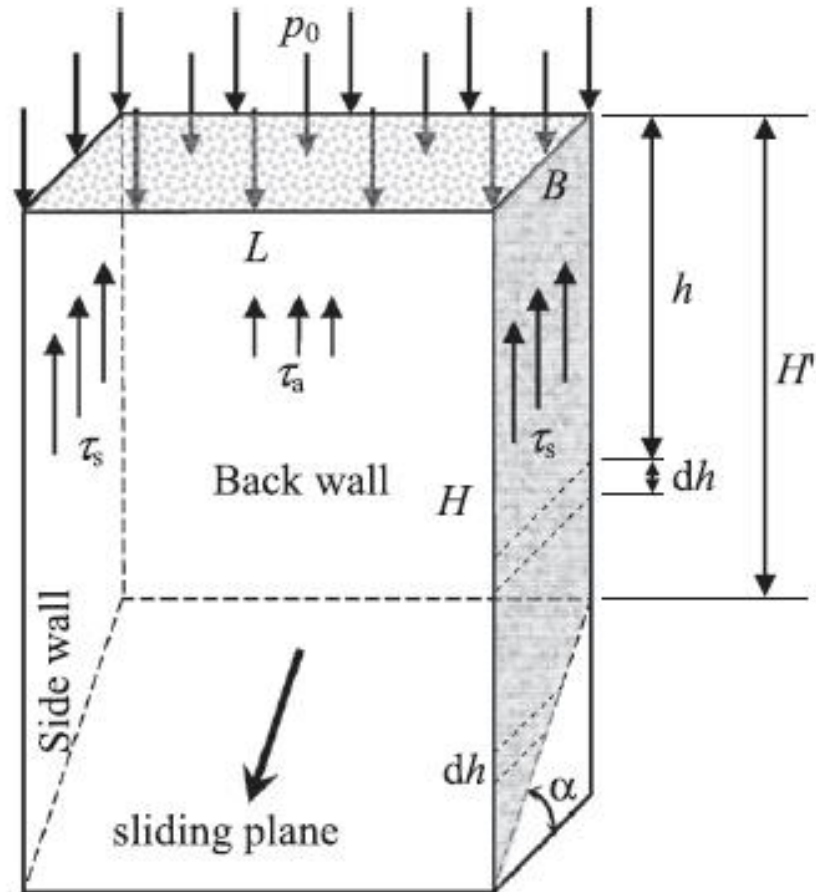


Figura 30. Tajeo relleno con carga superficial en la parte superior del relleno (Li 2014)

En la figura c_a y c_s son las cohesiones a lo largo de la interfaz relleno - pared posterior y las interfaces relleno - pared lateral, respectivamente. Puede ser expresado de la siguiente manera:

$$C_a = r_a C, C_s = r_s c$$

Donde:

r_a y r_s son los ratios de adherencia respectivos.

δ es el ángulo de fricción a lo largo del interfaz relleno – pared lateral ($\delta \leq \phi$) y σ

h es el esfuerzo normal horizontal a las paredes laterales a una profundidad h .

Usando soluciones de arqueado en dos dimensiones, el esfuerzo horizontal normal a las paredes laterales σh , puede ser evaluado como sigue. (5)

$$\sigma_h = \frac{\gamma L}{2 \tan \delta} \left[1 - \exp\left(\frac{-2Kh \tan \delta}{L}\right) \right] + Kp_0 \exp\left(\frac{-2Kh \tan \delta}{L}\right)$$

Donde K es un coeficiente de empujes de tierra. Para la mayoría de casos de tajeos rellenos, K toma un valor cercano al del coeficiente de presión de tierras de Rankine, como sigue:

$$K = K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$$

Las fuerzas cortantes debido a la resistencia al corte a lo largo de la pared lateral, S_s , pueden ser estimadas como sigue:

$$S_s = \int_0^{H'} \tau_s B dh + \int_{H'}^H \tau_s \frac{H-h}{\tan \alpha} dh = B \left(r_s c + \frac{\gamma L}{2} \right) \left(H - \frac{B \tan \alpha}{2} \right) - \frac{BL}{2} \left(\frac{\gamma L}{2K \tan \delta} - p_0 \right) + \frac{L^2}{4K \tan \delta \tan \alpha} \left(\frac{\gamma L}{2K \tan \delta} - p_0 \right) \left[\exp\left(\frac{-2K \tan \delta}{L} H'\right) - \exp\left(\frac{-2K \tan \delta}{L} H\right) \right]$$

Donde $H' = H - B \tan \alpha$

La fuerza cortante debido a la resistencia al corte a lo largo del interfaz relleno – pared posterior es dada como:

$$S_a = \tau_a LH' = r_a c LH'$$

Considerando el equilibrio de la cuña en las direcciones perpendicular paralela al plano de deslizamiento, el FS es obtenido y expresado como:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{2}{\sin 2\alpha} \left(\frac{p'}{c} - r_a \frac{H'}{B} - 2r_s \frac{H^*}{L} \right)^{-1}$$

Además, la cohesión puede ser expresada como:

$$c = p' \left[\frac{2}{(FS - \tan \phi / \tan \alpha) \sin 2\alpha} + r_a \frac{H'}{B} + 2r_s \frac{H^*}{L} \right]^{-1}$$

El parámetro p' es dado por:

$$p' = \frac{L}{2K \tan \delta} \left\{ \gamma - \frac{1}{B \tan \alpha} \left(\frac{\gamma L}{2K \tan \delta} - p_0 \right) \times \left[\exp\left(-\frac{2K \tan \delta}{L} H'\right) - \exp\left(-\frac{2K \tan \delta}{L} H\right) \right] \right\}$$

Con todo esto, puede ser calculado el valor de la resistencia a la compresión no confinada necesaria para el relleno con la siguiente expresión:

$$UCS = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

Si $\delta \rightarrow 0$, la ecuación de p' se reduce a:

$$p' = p_0 + \frac{\gamma(H + H')}{2} = p_0 + \gamma H^*$$

Además de eso, si $r_a = 0$, la solución generalizada se reduce a la solución de Mitchell modificado.

Si $\delta \rightarrow 0$, $r_a = 0$ y $p_0 = 0$, se reduce a la solución original de Mitchell et al. (1982), por otro lado, cuando $r_s = 1$, $H \gg B$ y el $FS = 1$, las ecuaciones se reducen al caso original de Mitchell. En algunos casos, puede producirse una grieta de tensión cerca a la parte superior del bloque de relleno expuesto. Li y Aubertin (2012) propusieron un método basado en la estimación de la altura de la grieta de tensión H_t , basada en las ecuaciones de empuje de Rankine. Esta altura puede ser estimada con la siguiente ecuación:

$$H_t = \frac{2c}{\gamma \tan(45^\circ - \phi/2)}$$

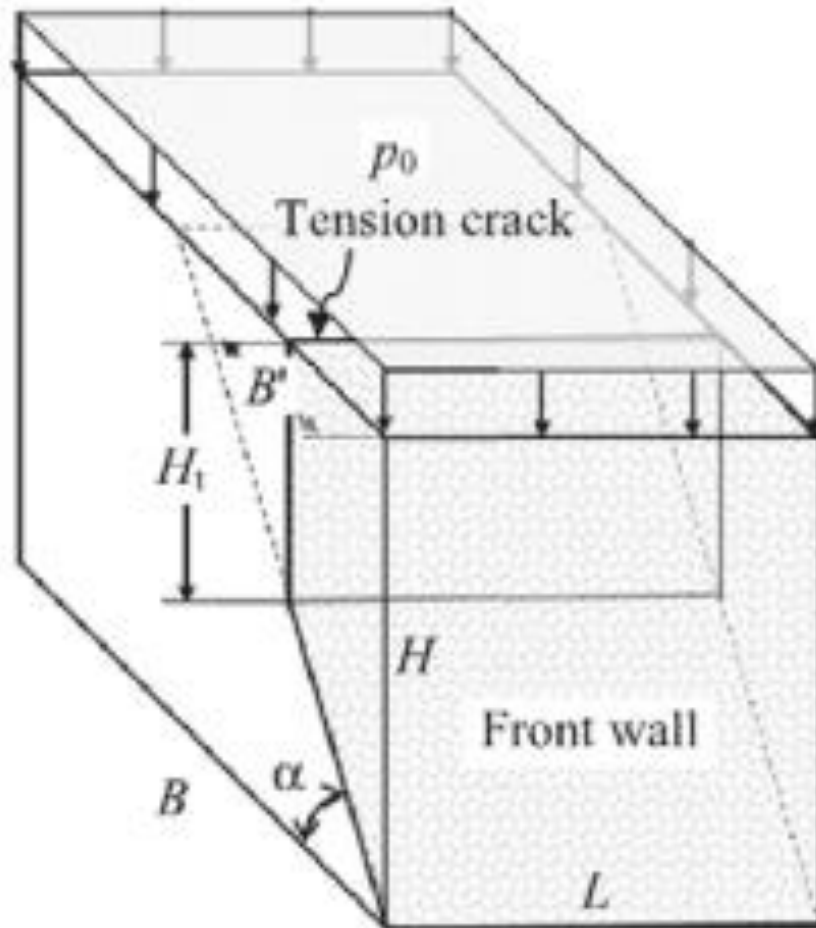


Figura 31. Bloque de relleno considerando grietas de tensión (Li y Aubertin 2012)

Como se aprecia en la figura N° 31 la aparición de la grieta de tensión ocurre a cierta distancia de la cara expuesta del bloque de relleno. Esta profundidad de la cuña B' se calcula como sigue:

$$B' = (H - H_t) / \tan \alpha$$

A partir de estas nuevas ecuaciones, el FS queda definido como:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{2}{\sin 2\alpha} \left(\frac{p'''}{c} - 2r_s \frac{2H - B' \tan \alpha}{L} \right)^{-1}$$

Donde la cohesión requerida para el relleno queda expresada como:

$$c = p''' \left[\frac{2}{(FS - \tan \phi / \tan \alpha) \sin 2\alpha} + r_s \frac{2H - B' \tan \alpha}{L} \right]^{-1}$$

El parámetro p''' es dado por:

$$p''' = \frac{L}{2K \tan \delta} \left\{ \gamma - \frac{1}{B' \tan \alpha} \left(\frac{\gamma L}{2K \tan \delta} - p_0 \right) \times \left[\exp\left(-\frac{2K \tan \delta}{L} H_t\right) - \exp\left(-\frac{2K \tan \delta}{L} H\right) \right] \right\}$$

4.5.3. Criterios de diseño para el caso en estudio

Para el presente caso de estudio, a partir del método generalizado de (Li 2014) y del caso de solución con grietas de tensión (Li y Aubertin 2012), se ha tenido en consideración los siguientes puntos:

- En la pared posterior, la cohesión en la pared posterior se asume la mitad de la cohesión del relleno. En otras palabras, el factor de relación de cohesiones en el interfaz relleno – pared posterior es igual a 0.5. De igual manera en las paredes laterales, se asume que la cohesión del interfaz relleno – pared lateral es aproximadamente la mitad de la cohesión del relleno, esto es, el factor de relación de ambas cohesiones es igual a 0.5.
- Para el cálculo de la carga en la parte superior del bloque de relleno P_0 , se ha considerado el efecto de arqueado del relleno, que es la reducción del esfuerzo vertical debido a la transferencia de peso a las paredes laterales, fenómeno estudiado por Terzaghi (1959) en suelos y rocas débiles. Debido a este

fenómeno, el esfuerzo vertical, que a la vez representa la carga sobre el relleno, puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\sigma'_v = p_0 = \frac{(B \cdot \gamma_b - 4c')}{4K_0 \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{4K_0 \tan \phi}{B} z}\right)$$

Donde z representa la altura de masa de relleno sobre el bloque a analizar y K0 es el coeficiente de empuje que relaciona el esfuerzo horizontal con el vertical. En este caso, se calculará con la fórmula de Jaky (1944):

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 1 - \sin \phi$$

4.5.4. Estimación de la resistencia de relleno para diferentes escenarios

Para la estimación de la resistencia de relleno requerida para garantizar la estabilidad del relleno durante la explotación de tajeos secundarios, se ha realizado una sensibilidad para diferentes factores de seguridad, con las siguientes consideraciones.

- Altura de los tajeos = 30 m
- Longitud de pared expuesta o longitud e tajeos secundario = 25 m
- Los criterios de UCS Mitchell, UCS Li (z=0) y UCS Tensión Crack (z=0), son equivalentes y considera la altura del relleno de 30 m, sin ninguna carga externa.
- Los criterios de UCS Li (z=30) y UCS Tensión Crack (z=30), son equivalentes y considera la altura del relleno de 60 m o dos tajeos primarios.
- Los criterios de UCS Li (z=60) y UCS Tensión Crack (z=60), son equivalentes y considera la altura del relleno de 90 m o tres tajeos primarios.

En las figuras siguientes se muestran de manera esquemática la geometría del relleno simulada y en los cuadros siguientes los valores de resistencia del relleno para los diferentes criterios de cálculo.

Tabla 12. Resistencia del relleno cementado requerido para una pared expuesta de 25 m de longitud y 30 m de altura

FS	Un tajeos primario = 30 m			Dos tajeos primarios=60m		Tres tajeos Primarios = 90 m	
	UCS Mitchell	UCS Li, z=0	UCS Tensión Crack, z=0	UCS Li, z=30m	UCS Tensión Crack, z=30m	UCS Li, z=60m	UCS Tensión Crack, z = 60 m
1.00	375	320	336	424	469	458	512
1.05	394	343	366	454	510	490	557
1.10	413	364	394	482	550	520	601
1.15	431	384	421	508	588	549	642
1.20	450	402	448	533	626	575	683
1.25	469	420	474	556	662	600	722
1.30	488	437	499	578	696	624	760
1.35	506	452	523	599	730	646	797
1.40	525	467	546	619	763	668	833
1.45	544	481	569	637	794	688	867
1.50	563	494	591	655	825	707	901

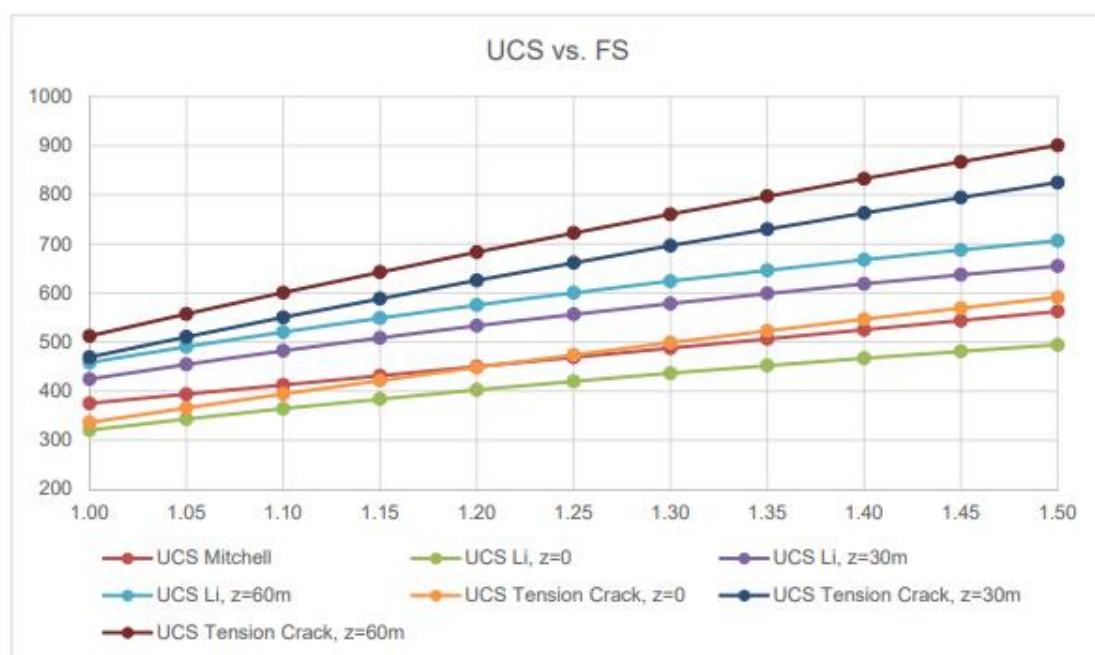


Figura 32. Resistencia del relleno cementado requerido para una pared expuesta de 25 m de longitud y 30 m de altura

Considerando que la resistencia del relleno insitu tiene una sensibilidad por diferentes factores operativos, dosificación de mezcla, variación de la granulometría del relave y otros, se recomienda considerar un factor de seguridad de 1.2. Para este escenario (25 m de longitud y 30 m de altura), la resistencia del relleno requerida para un tajo primario con relleno es 402 a 450 kPa, para dos tajos primarios con relleno será de 533 a 626 kPa y para tres tajos primarios con relleno será de 575 a 683 kPa.

4.6. Discusión de resultados

El ingeniero Huerta, Jorge (2018) en su investigación titulada: "*Optimización de las losas de relleno cementado de la U.P. Andaychagua*" tuvo como objetivo general evaluar el diseño de las mezclas para las losas de relleno cementado en los tajos de corte y relleno descendente de la U.P. Andaychagua. Llegó a las siguientes conclusiones:

- Los parámetros geomecánicos son imprescindibles para el diseño de la mezcla óptima, sustentando los factores de seguridad para implementar una losa de relleno cementado con una resistencia de 8 MPa, en reemplazo de una losa con una resistencia de 16 MPa.
- El diseño de mezcla óptima en tajos de 6 m de ancho es aplicable al 25 % de la veta Andaychagua.
- El valor de la resistencia a la compresión uniaxial de las losas de relleno cementado es una función de la cantidad de cemento utilizada en la mezcla, por lo que el cambio de un relleno con una resistencia de 16 MPa a otro de 8 MPa implica una diferencia en el costo del orden de 10,65 \$/m³ y considerando una programación de 12 000 m³ de relleno cementado por mes, genera un ahorro de \$123 000.

Producto de nuestra investigación concluimos que:

- Los resultados de los parámetros de resistencia insitu del relleno cementado correlacionado a partir de los ensayos SPT, indican que el ángulo de fricción, resistencia a la cohesión y resistencia a la compresión simple; hay un leve incremento con respecto a la altura del tajo y la resistencia vs. el tiempo de

fraguado no muestra una homogeneidad. Asimismo, a partir de los 46 a 142 días de fraguado, la resistencia del relleno muestra un leve descenso.

- En los ensayos de densidad insitu realizadas en calicatas de hasta 4 m de profundidad, se estimó que la variación de la densidad en el tiempo es nula (Densidad húmeda = 2.5 gr/cm^3) y la humedad está en el orden de 19 a 22 %, presentando un ligero descenso en el tiempo. Asimismo, se puede resaltar que los valores de humedad insitu encontrados en los tajeos son bajos.
- Considerando todos los parámetros de ensayos triaxiales realizados en el Cismid en muestras inalteradas de los tajeos primarios, para un análisis global de la resistencia, se determinó un ángulo de fricción promedio de $22^\circ (+/- 8^\circ)$ y resistencia a la cohesión promedio de 103 kPa (+/- 50), lo mismo que podrían ser representativos para tiempos de fraguado mayores a 60 días.

Asimismo, tras la comparación con los resultados de ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos.

- El análisis de los ensayos de resistencia a la compresión simple, se estimó un promedio de 247 kPa con una variación de la sensibilidad de +/- 150 kPa. Asimismo, tras la comparación con los resultados de ensayos de compresión simple obtenidas con los ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos.
- La revisión de la resistencia del relleno a lo largo de los años 2015 y 2016, realizado con edades desde 7 hasta 120 días de fraguado, donde se estimó que la resistencia del relleno, está en el orden de 200 a 400 kPa. Asimismo, se ha identificado que la evolución de la resistencia vs el tiempo de fraguado tiene un incremento de la resistencia en los primeros 20 a 40 días, posteriormente presenta un leve descenso de la resistencia. También, se identificó que las pruebas realizadas a partir de mediados del 2015 hasta la fecha, se ha manifestado una evolución de resistencia más uniforme.
- La granulometría del relave producido por Cerro Lindo, se ha identificado que este actualmente está en el rango de 33 a 43 % por debajo de la malla N° 200 (74 micras), Asimismo, en la historia de granulometría desde el 2011, se

evidencia una amplia sensibilidad granulométrica que podría afectar a la resistencia del relleno cementado.

- Los resultados de back análisis de fallas ocurridas en taludes de relleno cementado, dan parámetros de resistencia muy similares al estimado en los ensayos triaxiales promedio en laboratorio del Cismid con pruebas inalteradas.
- Para la estimación de la resistencia de relleno requerida para diferentes factores de seguridad, considerando los parámetros de 30 m de altura de tajo y 25 m de longitud; más los criterios de falla propuestos por Mitchell y Li, se estimaron las siguientes resistencias de relleno para uno, dos y tres tajeos primarios de altura.

En tal sentido compartimos ambas apreciaciones.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de los parámetros de resistencia *insitu* del relleno cementado correlacionado a partir de los ensayos SPT, indican que el ángulo de fricción, resistencia a la cohesión y resistencia a la compresión simple; hay un leve incremento con respecto a la altura del tajeo y la resistencia vs. el tiempo de fraguado no muestra una homogeneidad. Asimismo, a partir de los 46 a 142 días de fraguado, la resistencia del relleno muestra un leve descenso.
2. Considerando todos los parámetros de ensayos triaxiales realizados en el Cismid en muestras inalteradas de los tajeos primarios, para un análisis global de la resistencia, se determinó un ángulo de fricción promedio de 22° ($\pm 8^{\circ}$) y resistencia a la cohesión promedio de 103 kPa (± 50), lo mismos que podrían ser representativos para tiempos de fraguado mayores a 60 días.
3. Asimismo, tras la comparación con los resultados de ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos.
4. En los ensayos de densidad *insitu* realizadas en calicatas de hasta 4 m de profundidad, se estimó que la variación de la densidad en el tiempo es nula (Densidad húmeda = 2.5 gr/cm^3) y la humedad está en el orden de 19 a 22 %, presentando un ligero descenso en el tiempo. Asimismo, se puede resaltar que los valores de humedad *insitu* encontrados en los tajeos son bajos.
5. El análisis de los ensayos de resistencia a la compresión simple, se estimó un promedio de 247 kPa con una variación de la sensibilidad de ± 150 kPa. Asimismo, tras la comparación con los resultados de ensayos de compresión simple obtenidas con los ensayos SPT se encontró una similitud en los valores obtenidos. La revisión de la resistencia del relleno a lo largo de los años 2015 y 2016, realizado con edades desde 7 hasta 120 días de fraguado, donde se estimó que la resistencia del relleno, está en el orden de 200 a 400 kPa. Asimismo, se ha identificado que la evolución de la resistencia vs el tiempo de fraguado tiene un incremento de la resistencia en los primeros 20 a 40 días, posteriormente presenta un leve descenso de la resistencia. También, se

identificó que las pruebas realizadas a partir de mediados del 2015 hasta la fecha, se ha manifestado una evolución de resistencia más uniforme.

6. Para la estimación de la resistencia de relleno requerida para diferentes factores de seguridad, considerando los parámetros de 30 m de altura de tajo y 25 m de longitud; más los criterios de falla propuestos por Mitchell y Li, se estimaron las siguientes resistencias de relleno para uno, dos y tres tajeos primarios de altura.

RECOMENDACIONES

1. Considerando que la resistencia del relleno *insitu* tiene una sensibilidad por diferentes factores operativos, dosificación de mezcla, variación de la granulometría del relave y otros, se recomienda considerar un factor de seguridad de 1.2. Para este escenario (25 m de longitud y 30 m de altura), la resistencia del relleno requerida para un tajo primario con relleno es 402 a 450 kPa, para dos tajeos primarios con relleno será de 533 a 626 kPa y para tres tajeos primarios con relleno será de 575 a 683 kPa.
2. Se recomienda continuar con la campaña de ensayos de laboratorio con muestras inalteradas para determinar la resistencia a edades más jóvenes, menores a 60 días de fraguado.
3. Se recomienda realizar os ensayos de densidad *insitu* realizando calicatas ya que es un medio más eficiente.
4. Se recomienda evaluar la variabilidad de la resistencia del relleno vs. la variabilidad de la granulometría del relave.
5. Para recomienda que la información de la resistencia de relleno se encuentre actualizada y codificada para identificar rápidamente de acuerdo al tajeo que pertenece.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HUERTA, J. “*Optimización de las losas de relleno cementado de la U.P. Andaychagua*”. (Título de Ingeniero de Minas). Tacna - Perú. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2018, 231 pp.
2. CÓNDOR, W. *Evaluación técnico-económica y control de las variables de la planta de relleno en pasta unidad minera Iscaycruz*. (Título de Ingeniero de Minas). Huamanga - Perú. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, 2015, 157 pp.
3. AMBROCIO, E. *Uso de residuos mineros como relleno en minas subterráneas y criterios para un marco regulatorio*. (Título de Ingeniero de Minas y Metalurgista). Ciudad de México - México. Universidad Nacional Autónoma de México, 2017, 107 pp.
4. HASSANI, F., & ARCHIBALD, J. (1998). *Backfill mechanics. In Mine backfill. CIM, CD-ROM. MiningInfo*. (2017). Mine Backfill. [En línea] [Fecha de consulta: 5 de abril de 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/mininginfosite/miner-s-toolbox/backfill>.
5. LI, L. (2013). Generalized solution for mining backfill design. *International Journal of Geomechanics*. Junio 2014. 14(3), 04014006.

ANEXOS

Anexo A

Matriz de consistencia

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable
General	¿Cuál es el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo - 2020?	Determinar el resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo - 2020	El resultado de la evaluación de la resistencia de relleno cementado a través de la resistencia de la cohesión, fricción y factor de seguridad inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios, unidad minera Cerro Lindo - 2020.	Independiente Resistencia de relleno cementado
				Dependiente Estabilidad de tajeos secundarios
Específicos	a) ¿Cuál es el resultado de la evaluación del periodo de fraguado del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios?	a) Determinar el resultado de la evaluación del periodo de fraguado del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios	a) La evaluación del periodo de fraguado del relleno mediante ensayos de penetración, densidad insitu, humedad, inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios	
	b) ¿Cuáles son los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios?	b) Calcular los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios	b) Los resultados de la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del relleno inciden en el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios	
	c) ¿Cuáles son los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno?	c) Determinar los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno	c) Los resultados de la evaluación la resistencia del relleno existente y estabilidad de paredes expuestas al relleno permiten evaluar el deterioro por efecto de los sulfuros y sulfatos	

	Concepto	Dimensión	Indicador
VARIABLE INDEPENDIENTE	Son los resultados de los parámetros de resistencia insitu del relleno cementado correlacionado a partir de los ensayos SPT, indican que el ángulo de fricción, resistencia a la cohesión y resistencia a la compresión simple.	▪Periodo de fraguado del relleno	Días
RESISTENCIA DE RELLENO CEMENTADO		▪Propiedades físicas y mecánicas del relleno	% - MPa
		▪Resistencia del relleno existente	MPa
VARIABLE DEPENDIENTE	El factor de esfuerzo en la roca, A, refleja los esfuerzos actuantes sobre las caras libres del tajeo abierto en profundidad. Este factor es determinado a partir de la resistencia compresiva no confinada de la roca intacta y el esfuerzo actuante paralelo a la cara expuesta del tajeo bajo consideración. La resistencia de la roca intacta puede ser determinada mediante ensayos de laboratorio de la roca. El esfuerzo compresivo inducido se establece a partir del modelamiento numérico o se estima a partir de distribuciones de esfuerzos, usando valores de esfuerzos insitu medidas o asumidas.	▪Características geométricas	m
ESTABILIDAD DE TAJEOS SECUNDARIOS			

Anexo B

ENSAYO DE COMPRESION UNIDIMENSIONAL

ASTM - D3198

Informe N° : LG16-038

Fecha : Marzo, 2016

Solicitante : SRK CONSULTING (PERÚ) S. A.

Proyecto : Evaluación de la Resistencia del Relleno de Pinta In Situ

Ubicación : Av. La Paz 1227 N° 1227, Dist. Miraflores, Prov. y Dpto. Lima

Identificación

Sonda : Tejo - 08

AASHTO : A-4 (5)

Muestra : M - 4

SUCE : CL - ML // Arcilla limosa arenosa

Prof. (m) : --

Velocidad : 0.7 mm/min

Estado : Intactado

Hoja : 1 de 2

Especimen 01

Dímetro : 4.96 cm

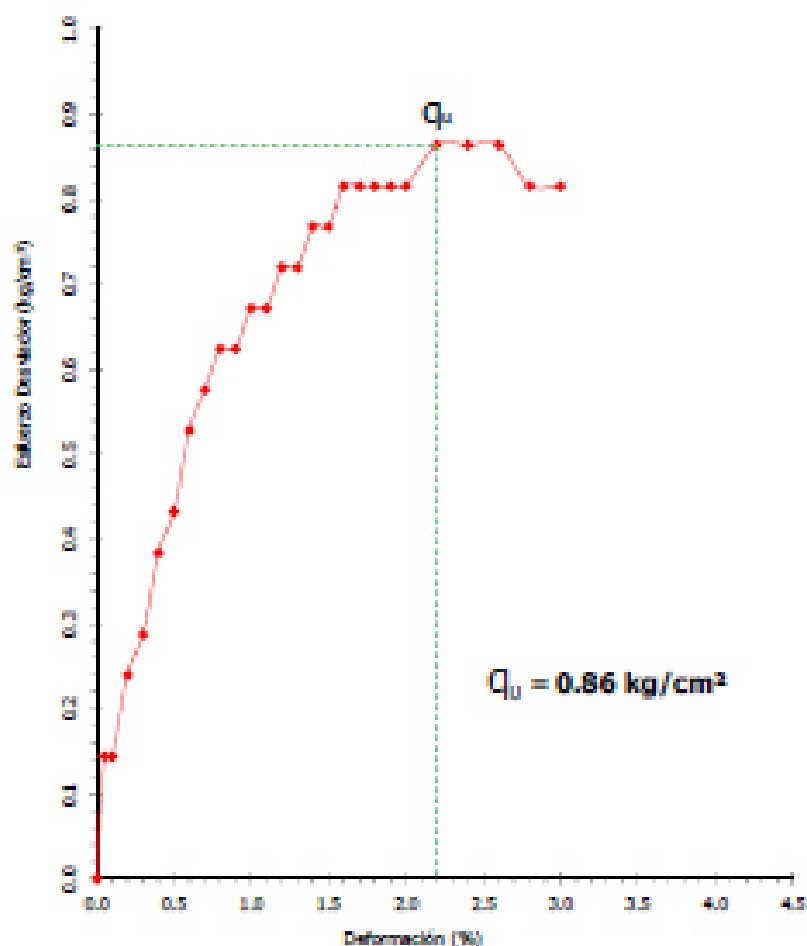
DEFORMACION vs. ESFUERZO

Altura : 9.97 cm

Humedad : 18 %

Densidad seca : 2.02 g/cm³

Def. (%)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0.00	0.00
0.05	0.14
0.10	0.14
0.20	0.24
0.30	0.29
0.40	0.38
0.50	0.43
0.60	0.53
0.70	0.58
0.80	0.62
0.90	0.62
1.00	0.67
1.10	0.67
1.20	0.72
1.30	0.72
1.40	0.77
1.50	0.77
1.60	0.82
1.70	0.82
1.80	0.82
1.90	0.82
2.00	0.82
2.20	0.86
2.40	0.86
2.60	0.86
2.80	0.82
3.00	0.82



Observaciones :

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

Anexo C



LABORATORIO GEOTECNICO

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres

Informe:

LG16-038

Solicitante : SRK CONSULTING (PERÚ) S. A.

Proyecto : Evaluación de la Resistencia del Relleno de Mina In Situ

Ubicación : Av. La Paz 1227 N° 1227, Dist. Miraflores, Prov. y Dpto. Lima

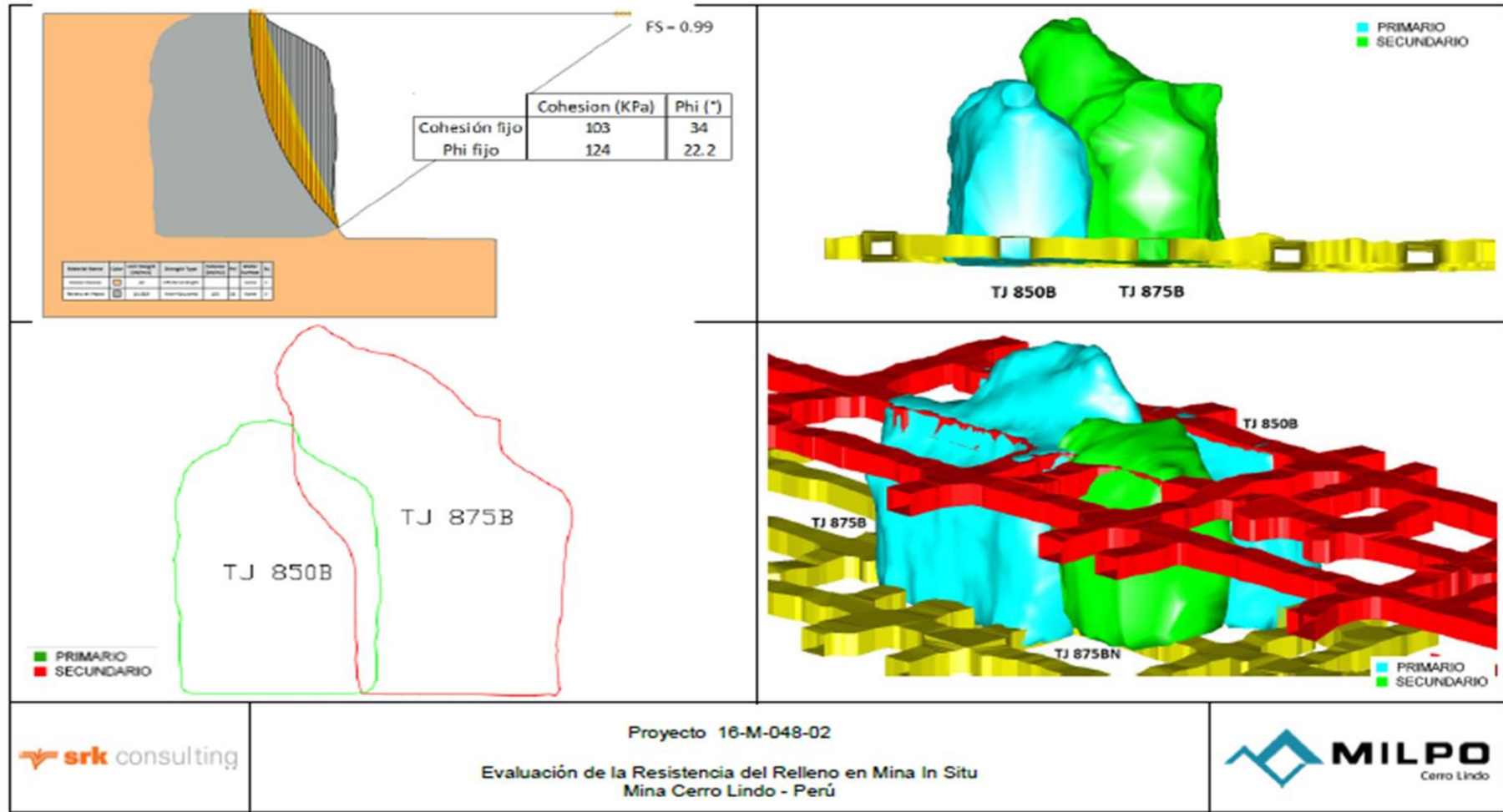
Fecha : Marzo, 2016

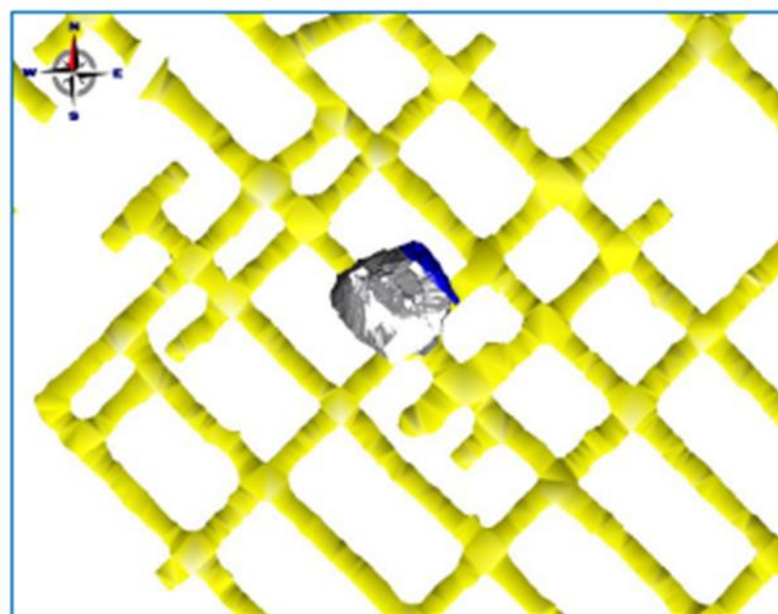
CARACTERIZACIONES FISICAS DE SUELOS

Número de orden		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Sondaje		Tajo - 08	Tajo - 08	Tajo - 14	Tajo - 14	Tajo - 14	Tajo - 16	Tajo - 16	Tajo - 16	Tajo - 16N	Tajo - 18	
Muestra		M - 3	M - 4	M - 1	M - 2	M - 4	M - 1	M - 3	M - 4	M - 2	M - 1	
Profundidad (m)		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Análisis granulométrico por tamizado Acumulado que pasa	3 *	76.20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	2 *	50.80	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	1 1/2 *	38.10	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	1 *	25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	3/4 *	19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	3/8 *	9.525	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	Nº 004	4.750	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.3	
	Nº 010	2.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.3	
	Nº 020	0.850	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	99.9	100.0	99.2
	Nº 040	0.425	99.9	99.6	99.7	99.9	99.8	99.5	99.8	99.4	99.6	98.9
	Nº 060	0.250	95.9	95.6	97.6	97.4	96.3	94.6	95.1	94.4	94.8	94.6
Nº 140	0.106	60.1	64.3	70.4	70.1	61.7	63.7	62.6	63.8	64.8	62.5	
Nº 200	0.075	54.8	56.0	62.3	62.1	53.7	55.0	55.4	55.0	56.7	53.5	
Contenido de humedad		19.7	20.7	18.8	17.7	18.8	15.7	20.5	21.8	20.9	5.4	
Límite líquido		16	20	17	16	17	16	18	16	20	NP	
Límite plástico		13	14	12	12	10	10	11	12	12	NP	
Índice de plasticidad		3	6	5	4	7	6	7	4	8	NP	
Límite contracción		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Clasificación AASHTO		A-4 (0)	A-4 (0)	A-4 (0)	A-4 (0)	A-4 (0)	A-4 (0)	A-4 (1)	A-4 (0)	A-4 (1)	A-4 (0)	
Clasificación SUCS		ML Limo arenoso	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL - ML Arcilla limosa arenosa	CL Arcilla delgada arenosa	ML Limo arenoso	

Activar
Ir a Config

Anexo D

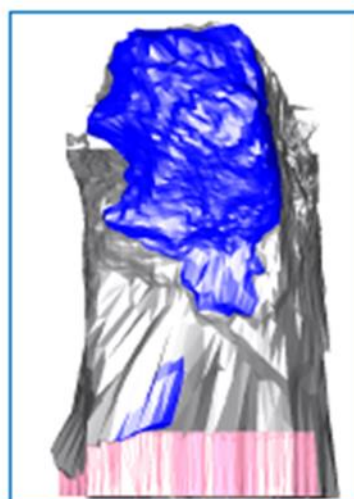




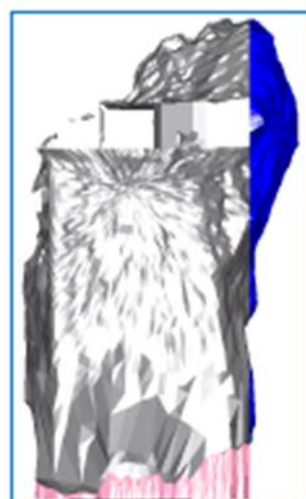
UBICACIÓN DEL TAJO



PARED FINAL SW



PARED NE



PARED FINAL SE

- Volumen desprendido
- Minado
- Remanente

PARED	LONGITUD (m)	ANCHO (m)	ALTURA (m)	ÁREA EXPUESTA (m ²)	PERÍMETRO (m)	RH (m)	VOLUMEN DESPRENDIDO (m ³)	ELOS (m)
NE	24	22	48	1152	144	8.00	825.81	0.72