

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

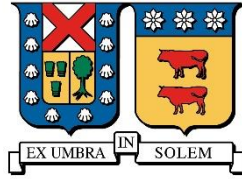
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**CARACTERIZACION GEOTÉCNICA DE RELAVES
MINEROS**

BRIAN MAURICE BEDWELL DE LUIGGI

Ingeniero Civil

Junio de 2022



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

CARACTERIZACION GEOTÉCNICA DE RELAVES MINEROS

Memoria de Título presentada por

BRIAN MAURICE BEDWELL DE LUIGGI

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía

MATÍAS FELIPE SILVA ILLANES

Junio de 2022

Resumen

Una de las principales dificultades para el diseño de los depósitos de relaves en la pequeña y mediana minería es la falta de información sobre las propiedades geotécnicas de los relaves que conforman los depósitos producto de que no se disponen de ensayos de laboratorio acordes a los requerimientos de las normativas actuales (i.e Decreto Supremo N°35), lo que se puede atribuir a deficientes o inexistentes campañas de exploración. Con el objetivo de aportar esta información, en el presente documento se incluye un resumen sobre el estado de los depósitos en Chile y se realiza un análisis de las principales propiedades geotécnicas de distintos relaves mineros provenientes principalmente de minas de cobre, realizando una comparación y categorización según su origen a través de propiedades índices y de caracterizaciones geotécnicas. Se incluye el análisis de los resultados obtenidos en distintos estudios para los ensayos de granulometría, densidades, consolidaciones, curvas de retención de aguas y resistencia. En donde, se observan bandas granulométricas bien definidas para cada tipo de relave analizado, efecto atribuido al proceso de cicloneo. Existe un rango acotado para el valor de gravedad específica (G_s) en torno a $2,9 \pm 0,3$. Caso contrario resulta la variabilidad observada para el peso específico (γ). Las arenas de relaves clasifican como un suelo SM y las lamas clasifican como CL y/o ML, en general los relaves exhiben baja o nula plasticidad. Se observa una mayor conductividad hidráulica (k) en las arenas de relave en comparación con las lamas, efecto esperado de acuerdo con la distribución granulométrica de cada uno de estos. No se tiene suficiente información para concluir sobre el coeficiente de consolidación (C_v). Se observa que existe una importante disminución de la resistencia no drenada (S_u) en la medida que se incrementa el contenido de finos. Por último, se proponen curvas granulométricas dependiendo del tipo de relave.

Palabras Clave: relaves, caracterización, propiedades índice.

Abstract

One of the main difficulties for the design of tailings deposits in small and medium-sized mining is the lack of information on the geotechnical properties of the tailings that make up the deposits, because of the lack of laboratory tests according to the requirements of current regulations (i.e., Decreto Supremo N°. 35), which can be attributed to deficient or non-existent exploration campaigns. To provide this information, this document includes a summary of the state of the deposits in Chile and an analysis of the main geotechnical properties of different mining tailings, mainly from copper mines, making a comparison and categorization according to its origin through index properties and geotechnical characterizations. The analysis of the results obtained in different studies for the granulometry tests, densities, consolidations, water retention curves and resistance are included. Where, Well-defined granulometric bands are observed for each type of tailings analyzed, an effect attributed to the cyclone process. There is a limited range for the value of specific gravity (G_s) around 2.9 ± 0.3 . Otherwise, the variability observed for the specific gravity (γ) results. The tailings sands classify as an SM soil and the slimes tailings classify as CL and/or ML, in general the tailings exhibit low or null plasticity. A higher hydraulic conductivity (k) is observed in the tailing sands compared to the slimes tailings, an expected effect according to the particle size distribution of each of these. There is not enough information to conclude on the consolidation coefficient (C_v). It is observed that there is a significant decrease in the undrained resistance (S_u) as the content of fines increases. Finally, granulometric curves are proposed depending on the type of tailings.

Keywords: tailings, characterization, index properties.

Índice

Resumen	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas.....	viii
Capítulo I – Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos y Alcances	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.2.3 Alcances.....	3
1.3 Legislación y reglamentación	3
1.4 Estándares y normas	5
Capítulo II – Relaves y Depósitos	7
2.1 Definiciones	7
2.2 Proceso minero	8
2.3 Técnicas de almacenamiento	9
2.3.1 Tranque de relaves.....	10
2.3.2 Embalses de relaves.....	10
2.3.3 Partes de un depósito	10
2.3.4 Técnicas alternativas.....	12
2.4 Técnicas de desaguado.....	12
2.4.1 Relaves espesados	12
2.4.2 Relaves Filtrados	13
2.4.3 Relaves en Pasta	13
2.4.4 Clasificación alternativa	13
2.5 Estabilidad de los depósitos.....	14
2.5.1 Estabilidad Física.....	14

2.5.2	Estabilidad Química	15
2.6	Fallas en Chile y el mundo	16
2.7	Depósitos en Chile	18
Capítulo III – Caracterización de relaves		22
3.1	VARIABLES DE ESTADO	23
3.1.1	Índice de vacíos	23
3.1.2	Humedad.....	24
3.1.3	Tensión efectiva.....	24
3.2	Base de datos de relaves analizados.....	24
3.3	Nomenclatura utilizada	25
3.4	Banda granulométrica	25
3.4.1	Clasificación de suelos	28
3.5	Parámetros geotécnicos.....	29
3.5.1	Gravedad específica.....	30
3.5.2	Densidad mínima y Proctor	30
3.5.3	Límites de consistencia.....	31
3.5.4	Mineralogía.....	32
3.6	Coefficiente de permeabilidad y consolidación	32
3.7	Curva de retención de agua (SWRC).....	35
3.8	Resistencia al corte	39
3.8.1	Definición	39
3.8.2	Respuesta drenada y no drenada.....	40
3.8.3	Parámetros de resistencia de relaves	40
3.8.4	Estado crítico o “Critical state”	43
Capítulo IV - Conclusiones		49
Bibliografía.....		53

Índice de Figuras

Figura 1.- Esquema de tranque de relaves y sus distintas partes.....	11
Figura 2.- Yield Stress para diferentes contenidos de sólidos en relaves de diferentes fábricas., Zuñiga and Suazo (2019).....	14
Figura 3.- Incidentes según modo de falla en depósitos de relave a nivel mundial. Modificado de Icold (2016).	17
Figura 4.- Distribución regional de relaves en Chile.....	18
Figura 5.- Proporción de tecnologías de depositación utilizadas en Chile.....	20
Figura 6.- Vista en Planta de los principales depósitos de relaves en Chile, comparados con el Cerro San Cristóbal, Chile. Carvajal A. and Pastén P (2018).	21
Figura 7.- Behaviour of soil characteristic quantities in dependency of the spilling location. Witt et al. (2004).....	23
Figura 8.- Recopilación de granulometrías de relaves provenientes de minas de Cobre.	25
Figura 9.- Banda granulométrica de arenas de relaves.	26
Figura 10.- Banda granulométrica de Lamas.....	27
Figura 11.- Banda granulométrica de relaves integrales.	28
Figura 12.- Carta de plasticidad de relaves analizados.....	31
Figura 13.- Forma típica de SWRC identificando distintos estados de desaturación. Vanapalli et al. (2002).....	36
Figura 14.- Comparación de formas de la curva de retención de agua para distintos tipos suelos. Fredlund and Rahardjo (1993).....	37
Figura 15.- SWRC de relaves diferenciados según origen. Modificado de Musso and Suazo (2018)	38
Figura 16.- Variación del ángulo de fricción interna con el contenido de finos.	42
Figura 17.- Variación promedio de la resistencia no drenada con el índice de vacíos y el contenido de finos. Campaña (2011).....	43
Figura 18.- Representación gráfica en los planos e-p'-q de la línea de estado crítico. Modificado de Figura 13 Campaña (2011).....	45
Figura 19.- Diagrama p'- q con sus respectivas variables.....	46
Figura 20.- Trayectoria de tensiones efectivas para ensayos triaxiales CIU en arenas de relaves Ovejería. Conejera (2016).	47

Figura 21.- Comparación curvas de consolidación isotrópica y líneas de estado último. Conejera (2016)	48
Figura 22.- Granulometrías y bandas propuestas según tipo de relave.	50

Índice de Tablas

Tabla 1.- Clasificación de relaves según fluencia.	14
Tabla 2.- Definiciones utilizadas por Sonami para los sectores productivos.	19
Tabla 3.- Depósitos chilenos con mayor capacidad aprobada. Modificado de Falcón and Urbano (2016).	21
Tabla 4.- Recopilación propiedades geotécnicas de relaves provenientes de minas de Cobre.	29
Tabla 5.- Recopilación propiedades de consolidación y conductividad de relaves provenientes de minas de Cobre.	34
Tabla 6.- Recopilación propiedades de resistencia de relaves provenientes de minas de Cobre.	40

Capítulo I – Introducción

1.1 Contexto

La explotación minera es una de las principales actividades económicas de Chile, siendo líder mundial en la producción de cobre a través de algunas de las faenas mineras a rajo abierto y subterráneas más grandes del mundo (Falcón & Urbano, 2016). La ingeniería chilena tiene un constante desafío en los ámbitos de extracción y producción, así como en la depositación y contención de sus desechos, en particular los relaves, tanto convencionales como espesados, en pasta y filtrados.

La estabilidad física y química de los depósitos de relaves es fundamental para la prevención de riesgos asociados (Villavicencio *et al.*, 2014a), tanto en etapas preliminares; en el diseño y construcción, como también en etapas posteriores de operación, o cierre. La normativa chilena vigente indica que los procedimientos para la aprobación de los proyectos, y los requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros están reglamentados por lo estipulado en el Decreto Supremo N°248 (SERNAGEOMIN, 2007). Pero, cabe destacar que a la fecha de publicación de la presente investigación se encuentra en una etapa de consulta pública un nuevo reglamento que deroga el D.S.248, este nuevo reglamento quedara definido con la publicación del Decreto Supremo N°35 (SERNAGEOMIN, 2021).

Para evaluar la estabilidad física de los depósitos se requiere un análisis de estabilidad en condiciones estáticas como sísmicas, y además este análisis se debe realizar en todas las etapas del proyecto, es decir, en la construcción, operación, y cierre de los depósitos. Para ejecutar dichos análisis se deben tener buenos parámetros de entrada, lo anterior con el objetivo que la salida o resultado del análisis sea lo más cercano y representativo de las condiciones reales presentes. Por lo tanto, para obtener un buen control de la estabilidad física de los depósitos se debe contar con una adecuada caracterización geotécnica (Carvajal & Pastén, 2018). Una adecuada caracterización tiene como objetivo obtener un conocimiento acabado de la respuesta y comportamiento del material, el cual este respaldado por ensayos de laboratorio o de terreno.

Se evidencia que para el desarrollo de cada proyecto idealmente debiesen existir parámetros de entrada particulares para el proyecto en estudio, pero esto no siempre es factible, ya que

generalmente para etapas preliminares de cada proyecto no se tiene esta información o no siempre se destinan recursos para realizar una caracterización adecuada. Cada proyecto dispone de diferentes cantidades de recursos y en función de las distintas necesidades estos se priorizan, lo cual puede resultar en la definición de una campaña geotécnica que tiene como resultado una caracterización inadecuada, insuficiente, o inexistente en algunos casos. Es común que estos escenarios se generen en la pequeña y mediana minería. Para ambas causas mencionadas existe la necesidad de recurrir a valores referenciales provenientes de la literatura con el objetivo de encontrar rangos de valores de los parámetros necesarios para desarrollar una preingeniería o ingeniería básica.

Con el objetivo de satisfacer los requerimientos señalados, este artículo presenta una recopilación y análisis de diferentes experiencias de campañas de exploración en distintos depósitos de relaves de Chile y el mundo. La base de datos incluye ensayos de clasificación, de resistencia, y permeabilidad. Los principales elementos que se describen y comparan son parámetros geotécnicos que habitualmente se utilizan y son reconocidos en el estado del arte para tener un conocimiento acabado de los suelos involucrados.

1.2 Objetivos y Alcances

A continuación, se detalla el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

1.2.1 Objetivo General

Generar y analizar una base de datos de parámetros geotécnicos a partir de experiencias pasadas de exploraciones en terreno y caracterización en laboratorio de diversos relaves mineros chilenos y del mundo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para el total cumplimiento del objetivo general de la investigación se definen los siguientes objetivos específicos:

- ❖ Dar a conocer y cuantificar el estado actual de los depósitos de relaves chilenos.
- ❖ Recopilar experiencias pasadas con relaves utilizados en investigaciones realizadas en el Laboratorio de ensaye de materiales y control de obras (LEMCO), perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María.
- ❖ Incorporar información de otros estudios e investigaciones a fines que analicen relaves principalmente chilenos y compararlos con relaves de otras partes del mundo.
- ❖ Comparar y analizar distintos parámetros de interés, entre estos, granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, clasificación de suelos, parámetros de estado, densidad mínima y Proctor, conductividad hidráulica, coeficientes de consolidación, curva de retención de aguas, y parámetros de resistencia al corte.
- ❖ Diferenciar, clasificar, y agrupar los distintos relaves estudiados en función de los valores analizados de los diferentes parámetros de interés considerados.

1.2.3 Alcances

El trabajo que se presenta se limita al estudio de los relaves considerados y mostrados en la investigación, en base a los cuales se analiza y se concluye respecto a sus características, propiedades, comportamiento y respuesta, lo cual no quiere decir que pueda existir un relave o suelo que no se haya considerado en el análisis que presente propiedades muy similares o completamente distintas a los relaves analizados producto de su origen, mineralogía o de las condiciones en las cuales este inmerso.

Por lo tanto, en el caso que se rescaten valores referentes a esta investigación para obtener valores preliminares de alguno de los parámetros analizados, dicha consideración se debe realizar con la responsabilidad correspondiente.

1.3 Legislación y reglamentación

El Gobierno de Chile a través del Ministerio de Minería establece el Decreto Supremo N°248, “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves” (SERNAGEOMIN, 2007a) con el objetivo de regular los depósitos de relaves del país.

A la fecha, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) mantiene en consulta pública un nuevo reglamento, el cual será oficializado con la publicación del Decreto Supremo N°35 (SERNAGEOMIN, 2021). Aunque el nuevo decreto deroga el actual D.S.248, este rescata sus principales objetivos y actualiza el reglamento en función de los nuevos estándares tecnológicos de la industria.

El nuevo decreto ha tomado en cuenta que desde que el D.S.248 se publicó hasta la fecha han cambiado los métodos de disposición de relaves sustancialmente. Por lo tanto, el nuevo decreto incluye o modifica consideraciones del antiguo decreto con el objetivo de cumplir con el diseño de los depósitos en aspectos relevantes como; la estabilidad física y química, hidrológicos e hidráulicos, como también en un sistema de gestión.

El D.S.35 modifica los requisitos y procedimientos de aprobación para los proyectos, establece las disposiciones y requisitos para el diseño, fija normas sobre los requisitos de reprocesamiento y/o explotación de los depósitos, incluye consideraciones para la implementación de un sistema de gestión, y por último establece los requisitos, condiciones, y plazos para que los depósitos existentes cumplan el nuevo reglamento.

Específicamente, en cuanto a los procedimientos para la aprobación de proyectos de diseño, construcción y operación de depósitos de relaves en la actualidad el D.S.248 indica que entre otros requerimientos se debe incluir la determinación de los parámetros de diseño geotécnicos, incluyendo los siguientes:

- Resistencia al corte
- Compresibilidad
- Permeabilidad
- Granulometrías
- Pesos unitarios
- Pesos específicos

➤ Plasticidad

En cambio, preliminarmente el D.S.35 cambia el enfoque sobre los requerimientos para la aprobación de proyectos de depósitos de relaves de acuerdo con lo siguiente:

Según lo indicado en el capítulo cuarto: “Clasificación por categoría de depósitos de relaves”, correspondiente al Título I: “Disposiciones Generales” del reglamento, se debe categorizar el depósito de relaves según su tipo, su nivel de consecuencias, y de acuerdo con su envergadura.

Luego, en función de la categorización obtenida y de acuerdo con lo establecido en el capítulo quinto: “Documentación mínima requerida para la presentación del proyecto de depósitos de relaves”, correspondiente al Título III: “Aprobación de Proyectos de Depósitos de Relaves” del reglamento, el artículo N°45 establece que el proyecto de relaves debe contener al menos lo siguiente:

1. Identificación del Usuario (Artículo N°46)
2. Estudio de justificación del sitio (Artículo N°47)
3. Características del depósito de relaves (Artículo N°48)
4. Características de los materiales del depósito (Artículo N°49)
5. Planes y programas del SGCOM (Artículo N°50)
6. Registro y presentación (Artículo N°67)

En donde a lo referente a la presente investigación, el cumplimiento del artículo N°49 es un cambio sustancial respecto a lo solicitado en el reglamento actual definido por el D.S.248, producto que el artículo N°49 solicita; incorporar al proyecto la caracterización del suelo de fundación y de los materiales que se utilizaran para la construcción del muro resistente, presentar un análisis de suelos especiales, e incluir la caracterización geotécnica, geoquímica y reológica del suelo en distintas fases de la materia.

Se evidencia que para el cumplimiento de lo descrito anteriormente el D.S.35 enfatiza en una correcta caracterización geotécnica a través de la realización de campañas de exploración que contemplen ensayos de campo como también ensayos de laboratorio.

Adicionalmente, con respecto a la estabilidad física de los depósitos el D.S.248 señala que se debe proporcionar un análisis de estabilidad de taludes de acuerdo con las siguientes fases definidas:

- Fase I : Simulación de estabilidad estática asumiendo licuefacción total de los relaves de la cubeta.
- Fase II : Simulación de estabilidad estática con determinación simplificada de las presiones de poros.
- Fase III : Análisis dinámicos basados en ensayos de propiedades dinámicas de los suelos, incluyendo cálculo de desplazamientos.
- Fase IV : Análisis para condición de cierre, incluyendo eventos solicitantes máximos y efectos del tiempo en las propiedades de los depósitos.

De una manera similar, el D.S.35 establece en el capítulo segundo: “Estabilidad Física”, correspondiente al Título V: “Consideraciones generales de diseño y generación de estudios” del reglamento, dos fases de análisis de acuerdo con lo descrito en el artículo N°71 y además define los factores de seguridad de acuerdo con el artículo N°72.

De forma complementaria a los reglamentos de aprobación descritos por los decretos D.S.248 o D.S.35 también se deben considerar las disposiciones planteadas en el Decreto Supremo N°72 del año 1985, modificado posteriormente a través del Decreto Supremo N°132 del año 2004, el cual establece el “Reglamento de Seguridad Minera” (SERNAGEOMIN, 2004).

En el mismo sentido de regular los tranques de relaves, el gobierno de Chile establece a través del Ministerio de Justicia el decreto con fuerza de ley N°1122, correspondiente al Código de Aguas (Ministerio de Justicia, 1981). El cual establece la creación de un reglamento especial que fija las condiciones técnicas que deben cumplirse en cualquier obra hidráulica, donde la creación de este reglamento se plasmó a través del Decreto Supremo N°50 (Ministerio del Obras Publicas, 2015).

Con la entrada en vigor del D.S.35, se modifica el Decreto Supremo N°50, en específico los artículos 294 y 295 referentes al Código de Aguas, en donde actualmente existen duplicidades de competencias entre el SERNAGEOMIN y la DGA (Dirección General de Aguas) para la aprobación de construcción de obras hidráulicas, como lo son los embalses o tranques de relaves.

Por su parte, el Instituto Nacional de Normalización (INN) indica que, para cualquier estudio de mecánica de suelos se debe utilizar la norma nacional (INN, 2014) en su versión más actualizada (2014). Esto último produce que exista un apoyo inherente en términos generales sobre las características, procedimientos, consideraciones de los distintos tipos de suelo, y además de los distintos ensayos de laboratorio descrito en el texto mencionado.

Los ensayos que se realizan para la caracterización de suelo en estudio se rigen bajo los procedimientos descritos principalmente en el Manual de Carreteras, Volumen N°8 (Dirección de Vialidad, 2019).

De manera complementaria, se recurre a la norma (INN, 2009), incluyendo los decretos supremos D.S. N°60 y N°61 (MINVU, 2011a, 2011b), con el objetivo de incorporar las definiciones en cuanto a tipo de suelo allí descritas.

1.4 Estándares y normas

Por último, la presente investigación se realiza bajo la normativa actual, recurriendo tanto a los estándares nacionales como internacionales elaborados para la realización de los distintos ensayos de laboratorio abordados más adelante. Particularmente cabe destacar las siguientes normativas:

- i. NCh 3236 Of.10 - Método para determinar la Granulometría (INN, 2010) y ASTM D422-07 - Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM, 2007)

- ii. NCh 1517/1, NCh 1517/2, y NCh 1517/3 - Límites de consistencia, Parte 1, 2 y 3 (INN, 1979a, 1979b, 1979c), y ASTM D4318-17 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM, 2017b).
- iii. NCh1532 Of.80 - Determinación de la densidad de partículas sólidas (INN, 1980a), y ASTM D854-14 - Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM, 2014).
- iv. ASTM D2487-17 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM, 2017a).
- v. NCh 1726 Of.80 - Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos (INN, 1980b), ASTM D4253-16 - Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table (ASTM, 2016b), y ASTM D4254-16 - Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density (ASTM, 2016c).
- vi. NCh 1534/1 Of.08 y NCh 1534/2 Of.08, Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad - Parte 1 y Parte 2 (INN, 2008a, 2008b), y ASTM D698-21 - Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard (ASTM, 2021).
- vii. ASTM D2434-19 - Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (ASTM, 2019).
- viii. ASTM D2435-11 - Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading (ASTM, 2011)
- ix. ASTM D3441-16 - Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils (ASTM, 2016a)
- x. ASTM D2850-15 - Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils (ASTM, 2015)
- xi. ASTM D2573-18 - Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils (ASTM, 2018)
- xii. ASTM D2166-16 - Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil

Capítulo II – Relaves y Depósitos

2.1 Definiciones

Según el Decreto Supremo N°248, “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves” (SERNAGEOMIN, 2007a) las definiciones de relave y depósito de relave son las siguientes:

- ❖ Relave : “Suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplicará, también, a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente.”
- ❖ Depósito de relave : “Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos.”

El D.S.35 realiza una actualización de las definiciones anteriores, en donde el relave se define directamente como un residuo, y en el caso de los depósitos se otorga un mayor énfasis a la estabilidad y se mencionan las obras anexas. Ambas definiciones actualizadas de acuerdo con el D.S.35 (SERNAGEOMIN, 2021) son las siguientes:

- ❖ Relave : “Residuos mineros provenientes de los procesos de extracción de minerales, consistente en una mezcla de roca molida con agua y otros compuestos provenientes de un proceso de molienda, la cual usualmente se genera como resultado de haber extraído los minerales en plantas de concentración húmeda. Este término también se aplicará a la fracción sólida de dicha mezcla.”

- ❖ Depósito de relave : “Toda estructura u obra civil concebida para el almacenamiento seguro y estable, tanto física como químicamente, de relaves. Esto incluye todos los componentes y equipos necesarios para la disposición, almacenamiento y distribución de los relaves o los materiales compuestos por estos; Incluyendo además las obras anexas, tales como caneles perimetrales, relaveductos, vertederos, presas secundarias, drenes, materiales de empréstito, sistema de descarga y evacuación de crecidas, piscinas de emergencia, sistema de transporte de relaves, sistema de recuperación de aguas, sistemas eléctricos y de instrumentación.”

2.2 Proceso minero

Producto que en Chile existen en su mayoría yacimientos de Cobre, la minería chilena está focalizada en la extracción de este mineral y como subproductos se obtiene el Molibdeno, la Plata y el Oro. Por lo tanto, los relaves presentes en Chile provienen principalmente del proceso minero de la extracción del Cobre y están depositados en su mayoría en tranques de relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

De forma bastante general y sintetizada, el proceso minero del Cobre consta de una primera etapa de extracción del mineral (minería a rajo abierto o subterránea) seguida de una segunda etapa de chancado, en la cual se disminuye el tamaño de partícula del material para ser procesado. Luego del acopio, en función de la mineralogía del yacimiento (óxidos o sulfuros de cobre) se procede a la obtención del mineral.

En el caso de los óxidos de cobre, generalmente el mineral se extrae mediante pilas de lixiviación con el objetivo de obtener una solución rica en cobre, llamada “PLS” (Pregnant Leaching Solution), la cual a través de la hidrometalurgia luego pasa por los procesos de extracción por solventes y finalmente por la electro-obtención. Cabe destacar que el proceso de los óxidos de cobres no aporta en gran medida a los relaves mineros, ya que el principal desecho de este proceso son los estériles originados como desechos de las pilas de lixiviación.

Por el contrario, la principal fuente de relaves es producto del proceso minero de los sulfuros de cobre, el cual posterior al chancado consta de una etapa de molienda y flotación que tienen como objetivo obtener un concentrado del mineral. En una siguiente etapa el concentrado pasa a la fundición, en donde a través de la pirometalurgia, la cual consta de los procesos de tostación, fusión, conversión, refinado a fuego, moldeo de ánodos, y finalmente electro-refinación, se obtiene el cobre comercializable.

Es en el proceso de flotación donde se obtiene la mayor parte de relaves en forma de pulpa de relave o “slurry”. Para que la pulpa de relave sea lo más estable en el flujo, esta debe contener alrededor de un 30% a 40% de contenido de sólidos (SERNAGEOMIN, 2004). La pulpa o lodo de relave fluctúa en una razón aproximada de agua/sólidos que va del orden de 1:1 a 2:1 (SERNAGEOMIN, 2007b, 2016) y dependiendo de la necesidad de recuperar agua

en la faena minera esta proporción agua/sólido puede clasificar los relaves como, relaves espesados, relaves filtrados y relaves en pasta.

Previo a la depositación de los relaves, estos son segregados en dos partes en función de un límite granulométrico preestablecido en cada mina. La pulpa de relave proveniente del proceso minero se divide a través de un hidrociclón (equipos destinados al tratamiento de pulpas sólido-líquido) en una parte gruesa y una parte fina. Estos equipos generalmente utilizan dos torbellinos (primario y secundario) desde donde se obtiene un primero flujo llamado descarga (Arenas de relave), y un segundo llamado rebose (Lamas).

Por último, dependiendo de la técnica de almacenamiento y la técnica de desaguado adoptadas en cada mina, los relaves generados del proceso minero descrito se contienen en grandes áreas de terreno llamadas depósitos de relaves.

Las propiedades de los relaves varían dependiendo del procesamiento que tenga la roca de origen del mineral y el material individual que se desea separar, ya sea; Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Oro (Au), Hierro (Fe), y Uranio (U) (Lottermoser, 2010), además de las técnicas a utilizar en su depositación, que dependerá de las características de estos, como por ejemplo el tamaño de grano del material, cantidad de agua de la pulpa de relave y de las características del emplazamiento para este (SERNAGEOMIN, 2007b).

Entre los efectos más preponderantes que cambian las propiedades de los relaves en los depósitos, se han estudiado ampliamente los procesos de decantación, sedimentación, y consolidación. En donde, el primero hace alusión a la separación de la mezcla heterogénea de la pulpa de relave en agua y sólidos, además de su posicionamiento en los depósitos en función de sus densidades. Por su parte, la sedimentación se refiere a generación de capas en los depósitos producto de la depositación en distintas etapas. Por último, la consolidación hace referencia a cómo cambia el índice de vacíos en la profundidad del depósito en función de las cargas que tienen las distintas capas de este, lo cual habitualmente puede generar asentamientos.

Independiente del tipo de relave a desechar y de las propiedades que lo caracterice, este debe ser acopiado de la forma más viable y segura según los requerimientos específicos del proyecto minero.

2.3 Técnicas de almacenamiento

A continuación, se realiza una breve reseña de los tipos de relaves que existen hoy en día en la realidad nacional, y cuáles son sus principales características. Los distintos tipos de depósitos de relaves que son considerados en la actualidad en Chile son los indicados en el Decreto Supremo N° 248, es decir, los tranques de relaves y los depósitos de relaves.

Dependiendo de factores como las cercanías al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves, topografía del lugar, producción del yacimiento se deberá seleccionar la forma más apropiada para disponer los relaves (SERNAGEOMIN, 2007a).

Los tranques de relave y embalse de relave se construyen de manera similar y corresponden a las tipologías más comunes (Troncoso et al., 2017).

2.3.1 Tranque de relaves

Un tranque de relaves es aquel depósito en el cual el muro de contención es construido por la fracción más gruesa de los relaves correspondiente a arena compactada, y la parte fina de los relaves se deposita en la cubeta del depósito.

La fracción más gruesa de arena debe estar constituida por no más de un 20% de partículas menores a la malla N°200 (SERNAGEOMIN, 2007a) y el muro resistente debe tener ángulos de talud que maximicen la estabilidad de este, generalmente a razón 3:1 (SERNAGEOMIN, 2004). En general se clasifican como suelo arenoso con contenido de finos generalmente en el rango de 10 a 30% (Verdugo, 2009).

La cubeta del tranque se compone de lamas y de relave integral (relave no ciclonado). La mayor parte corresponde a relave integral, el cual tiene un porcentaje de finos en torno al 50 % y su concentración de sólidos varía entre el 50% y 65%, lo que permite transportarlo gravitacionalmente en forma de pulpa. Por otro lado, una menor parte se deposita en la cubeta en forma de lamas provenientes del proceso de hidrociclado, las cuales tienen un porcentaje de finos mayor o igual al 80% (Conejera, 2016).

Adicionalmente existe una clasificación de los tranques de relaves según el proceso constructivo que estos adopten. Según lo anterior, se pueden clasificar como; construcción aguas abajo, construcción por eje central, y construcción aguas arriba, siendo esta última prohibida en Chile en el año 1970 según lo dispuesto en el artículo N°28 correspondiente al título III: “Mantención y operación” del decreto N°86 publicado por el Ministerio de minería, en donde se especifica que solo se podrán operar los depósitos según un programa de construcción por eje central, y construcción aguas abajo (Ministerio de Minería, 1970).

2.3.2 Embalses de relaves

Similares a las estructuras de contención de agua, los depósitos de relave son aquellos donde el muro de contención está construido de material de empréstito o enrocados y además se encuentran impermeabilizados en el coronamiento y en su talud interno. Generalmente no es una alternativa muy económica producto del costo asociado a la construcción del muro de contención.

También suelen llamarse embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión natural del terreno que no requieren construcción de un muro de contención.

2.3.3 Partes de un depósito

En la Figura 1 se muestra un tranque de relaves construido aguas abajo, en donde se pueden identificar las principales partes de un depósito.

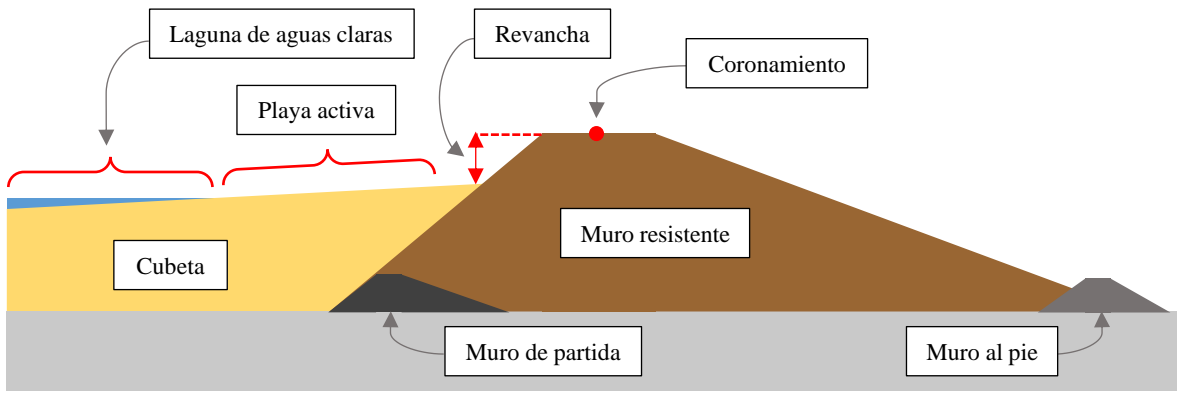


Figura 1.- Esquema de tranque de relaves y sus distintas partes.

Ya sea en los tranques de relaves como también en los embalses, en estas obras de ingeniería se pueden distinguir los siguientes elementos mostrados en la Figura 1, los cuales se definen según el D.S N°248 (SERNAGEOMIN, 2007a) como:

- ❖ Muro : Obra de ingeniería que permite contener los residuos sólidos que en ella se descargan, delimita una cubeta.
- ❖ Cubeta : Corresponde al volumen físico disponible para el depósito de relaves (lamas o relave integral), junto con gran parte del agua de los relaves. En la cubeta, el agua se localiza en la laguna de aguas claras.
- ❖ Laguna de aguas claras : La depositación de lamas en la cubeta llegan en una mezcla de sólido con agua para su transporte, donde los sólidos sedimentan a las capas inferiores y el agua forma una laguna de aguas claras debido a la sedimentación o decantación de las partículas finas.
- ❖ Coronamiento : Es la parte superior del prisma resistente o muro de contención, muy cercano a la horizontal.
- ❖ Revancha : Es la diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves.
- ❖ Canal de contorno : Canal de desvío de las aguas de la cuenca que captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el ingreso a la cubeta del depósito de relaves.
- ❖ Playa activa : Zona donde se descargan los relaves en la cubeta, se le denomina playa porque usualmente esta seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito de relaves o lamas situada en las cercanías de la línea de vaciado.

El D.S.35 actualiza en menor medida las definiciones anteriores y además incluye definiciones adicionales sobre terminología asociada a las distintas etapas de un depósito.

2.3.4 Técnicas alternativas

Por último, existen otras técnicas de depositación de relaves adicionales a los tranques y embalses, las cuales no son de uso común y han surgido como maneras alternativas de depositación. En este contexto existen por ejemplo los depósitos en minas subterráneas, en rajos abiertos, en minas abandonadas, depósitos costeros (prohibido en Chile), depósitos submarinos, o depositación mixta entre alguno de los métodos mencionados anteriormente.

2.4 Técnicas de desaguado

Con la incipiente escasez hídrica producto de efectos climáticos y además con el propósito de mejorar la eficiencia de los procesos mineros, como también con el objetivo de reducir los costos asociados a la contención de relaves mineros, y además tomando en cuenta las restricciones legales en el uso de los derechos agua según lo dispuesto por el código de aguas (Ministerio del Obras Publicas, 2015), en el último tiempo se han desarrollado alternativas de contención que promueven un menor contenido de agua en los depósitos. Para lograr los objetivos descritos se han incorporado técnicas como la sedimentación y filtración utilizadas de manera similar en los procesos de potabilización del agua.

2.4.1 Relaves espesados

El D.S. 248, define los relaves espesados como relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua contenida. Como resultado se genera una mezcla viscosa de relave y agua, que no se segrega una vez depositado (SERNAGEOMIN, 2007a).

Con la ayuda de un espesador, en donde se promueve la sedimentación de los sólidos y la recuperación del agua contenida, esta última puede ser reutilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. La concentración de sólidos alcanzada en los relaves espesados es de alrededor del 65 a 75%.

La reducción del contenido de agua en los relaves espesados provoca que el relave no se segregue y así sea más homogéneo. Además, producto que el agua remanente generalmente se seca debido a la evaporación, esto produce que el relave alcance el límite de contracción, lo que representa un estado geotécnico denso, no licuable, y sísmicamente estable (Galaz, 2011b; Ulrich & Coffin, 2017).

Es frecuente la adición de floculantes que aceleran el proceso de aglomeración, y se debe considerar el porcentaje de partículas de arcillas, ya que pueden llegar a generar algún problema en el proceso de sedimentación (SERNAGEOMIN, 2015a)

Un depósito de relaves espesados debe diseñarse de manera tal que el relave fluya solo al área de diseño generalmente de forma cónica con pendientes de 2 a 6% (Verdugo & Santos, 2009). El diseño puede contar con un pequeño muro de contención que ayude a la depositación en el área de diseño (los relaves espesados se consideran autosustentables) y promueva la recuperación de agua a través de un sistema de recuperación adicional (SERNAGEOMIN, 2020c).

Por otro lado, los relaves espesados presentan particularidades que provocan que se dificulte su caracterización geotécnica mediante técnicas convencionales. Se debe tener en cuenta que

la consistencia de los relaves espesados produce un material viscoso que por lo general exhibe un comportamiento no-newtoniano. Para estos materiales, la variable de importancia es el esfuerzo de corte (Gómez et al., 2012; N. Ramírez, 2007; Vergara, 2021). Por último, respecto al depósito de relaves espesados estos pueden ser afectados por fenómenos de licuefacciones o de consolidación. Con respecto, al primero este todavía está sujeto a mucha investigación y conjeturas, sin embargo en las consideraciones para el uso de relaves espesados y en pasta, esto es un factor que debe ser evaluado en particular si los relaves espesado fueran co-depositados con una fracción gruesa (SMCV, 2004). En cambio, con respecto al fenómeno de consolidación muchos depósitos de relaves espesados alcanzarán una condición de consolidación primaria dentro de un tiempo muy próximo a la deposición y facilitando esto de una forma muy temprana el acceso al relave para su rehabilitación u otras actividades (Gómez et al., 2012)

2.4.2 Relaves Filtrados

Con el objetivo de recuperar aún más agua con respecto a los relaves espesados, los relaves son tratados en un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros (SERNAGEOMIN, 2007a). Los relaves filtrados son similares a los relaves espesados, estos se diferencian en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado, para asegurar así una humedad cercana al 20%.

Por tanto, son relaves similares a los espesados, pero contienen menor cantidad de agua. Se genera lo que se conoce como “torta seca”, quedando en un estado no saturado que permite una compactación óptima. Aunque, el contenido de humedad que se logra permite el manejo del relave hasta con equipos de movimiento de tierra, este contenido es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado en profundidad considerando el efecto de la consolidación (Gómez et al., 2012).

2.4.3 Relaves en Pasta

Un relave en pasta se define como la situación intermedia entre relaves espesados y filtrados, corresponden a una mezcla de agua con relaves sólidos, que contiene abundantes partículas finas y bajo contenido de agua (10 a 25%), de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad (Romero & Flores, 2010; SERNAGEOMIN, 2007). Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones (Ramírez, 2007).

2.4.4 Clasificación alternativa

Anteriormente se diferenciaron los relaves espesados, filtrados y en pasta según el contenido de sólidos o de agua, pero los relaves también se pueden clasificar de una manera alternativa según el límite de fluencia que estos alcanzan.

El beneficio de esta clasificación es que para un mismo contenido de sólidos su comportamiento mecánico puede ser distinto, comportamiento que no se rescata solo con clasificar por contenido de agua (Ulrich & Coffin, 2017; Ulrich & Kerr, 2011). Se pueden establecer rangos generales según la Tabla 1.

Tabla 1.- Clasificación de relaves según fluencia.
Fuente: Extracto de Ulrich and Coffin (2017)

Límite entre tipo de relave	Límite de fluencia [Pa]
Convencional – Espesado	≈ 5 a 20
Espesado – Pasta	≈ 100
Pasta – Filtrado	≈ 800

Para complementar la tabla anterior, se puede relacionar la tensión de fluencia con el contenido de sólidos presente en los relaves de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2. En donde se observa esquemáticamente el porcentaje de contenido de sólidos que se puede alcanzar con las distintas técnicas de desaguado analizadas (Zuñiga & Suazo, 2019).

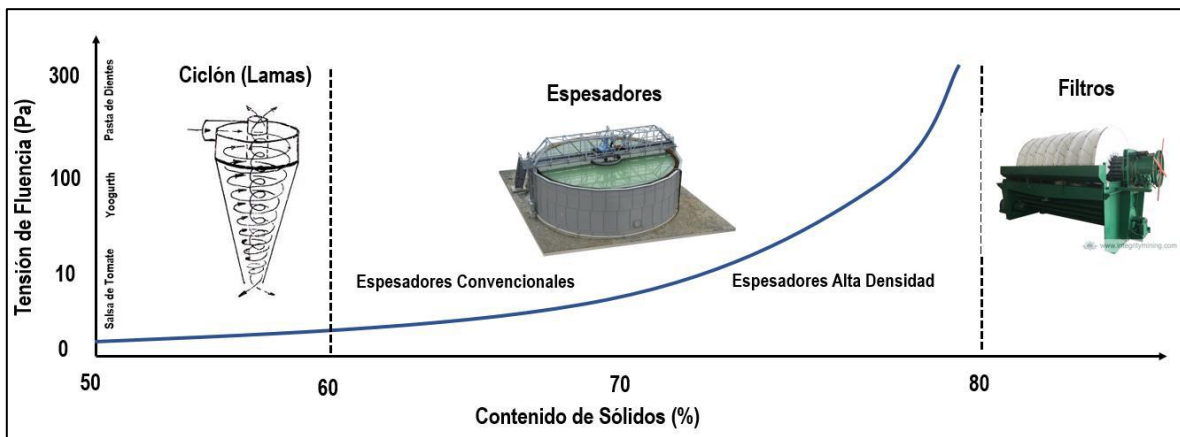


Figura 2.- Yield Stress para diferentes contenidos de sólidos en relaves de diferentes fábricas., Zuñiga and Suazo (2019).

2.5 Estabilidad de los depósitos

La estabilidad de los depósitos se puede definir y distinguir entre estabilidad física y estabilidad química, las cuales se describen a continuación.

2.5.1 Estabilidad Física

Según la “Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes” (SERNAGEOMIN, 2018) , la estabilidad física corresponde a la respuesta esfuerzo deformacional a largo plazo de una estructura remanente, frente a solicitaciones desestabilizadoras estáticas o dinámicas, que no requiere la implementación de obras, medidas ni actividades adicionales a las consideradas en el proyecto de cierre, para el resguardo de la vida, salud y seguridad de las personas y del medio ambiente.

En todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto minero y en todas las instalaciones que lo componen, se debe controlar la estabilidad física con el propósito de mantener esta condición en conformidad con lo indicado en el proyecto de cierre.

Algunos de los factores de entorno que interfieren en la estabilidad física de los depósitos de relaves son; factores procedentes de la atmósfera y otros inducidos por la operación de los depósitos, como lo son, la lluvia, los deshielos, evaporación, extracción de agua excedente de la laguna de decantación por bombeo, ingreso de agua subterránea, drenaje de agua desde

la fundación o a través del muro. En cambio, algunos de los factores derivados de las propiedades físicas de los relaves que interfieren en la estabilidad física son; la consolidación, infiltración, escurrimiento superficial y el ascenso capilar, que son propios de un material de granulometría fina (Musso & Suazo, 2018). En cuanto a los materiales de granulometría gruesa, el grado de compacidad o la compactación de los relaves es un factor relevante y que se debe considerar en el estudio de la estabilidad física de los depósitos (SERNAGEOMIN, 2018).

La operación del depósito de relaves deseable es mantener el posicionamiento de la laguna de decantación lo más alejada de los bordes, específicamente del muro y con un tamaño razonablemente pequeño, es decir, mientras más alejada se encuentre la laguna de decantación del muro, mayor será la estabilidad del depósito de relaves (Villavicencio *et al.*, 2014b). Además, si la laguna tiene un tamaño pequeño resulta ser más fácil la reutilización del agua que esta contiene (Berger, 2021). El posicionamiento de la laguna de aguas claras provoca una gran influencia del nivel freático en el interior del depósito, el cual, a su vez, tiene una influencia directa en la estabilidad física del depósito de relaves (Rodríguez & Oldecop, 2011). El incremento de contenido de humedad del material disminuye sus propiedades de resistencia, acentuando la caída de los mismos para grados de saturación superior a 75 y 80% (Rodríguez & Oldecop, 2006).

La inestabilidad física de una instalación minera remanente induce a daños estructurales, generado por la pérdida o reducción de sus capacidades resistentes y/o deformaciones excesivas que afecta su desempeño, función y uso, perjudicando la vida, salud y seguridad de las personas y/o del medio ambiente.

2.5.2 Estabilidad Química

Por otro lado, la estabilidad química es la situación de control en agua, aire y suelo de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una faena minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua u oxígeno con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y rípios de lixiviación (Galaz, 2011a).

Un depósito de relaves se encuentra estable químicamente cuando, en su interacción con los factores ambientales, no genera impactos que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente. La gestión para lograr estabilidad química se debe desarrollar a lo largo de toda la vida útil de las instalaciones que componen una faena minera, con el fin de llegar a la condición de estabilidad en el momento del cierre, donde la labor principal está centrada en limitar la generación de drenaje ácido minero (DAM) o “Acid mine drainage” (AMD), (SERNAGEOMIN, 2015b).

El fenómeno de drenaje ácido minero es producido como consecuencia de la oxidación de minerales sulfurados que han sido expuestos a humedad y condiciones oxidantes, generando una reducción del pH del agua de infiltración, y de esta manera favorece la formación de aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales pesados, debido a la lixiviación de sulfuros metálicos (Aduvire, 2006), provocados por procesos de oxidación abiótica y oxidación biótica.

La importancia del estudio del drenaje ácido minero es debido a los efectos adversos que provoca en el medio ambiente (Aduvire, 2006), siendo los más importantes los siguientes: afecta a ecosistemas acuáticos, deteriora la calidad de las aguas, tanto superficiales como también subterráneas, afectando a comunidades, impide el crecimiento de especies vegetales por la acumulación de hierros y de sulfuros que dificulta la penetración de raíces, y dificulta la estabilización de los residuos mineros.

2.6 Fallas en Chile y el mundo

El manejo de los relaves mineros es un ámbito de suma preocupación en el rubro minero producto de las consecuencias medioambientales que conlleva el diseño, la construcción, la operación, y el cierre de los depósitos de relave.

La seguridad de los depósitos de relaves debe procurar tanto la verificación de su estabilidad física como también de su equilibrio químico. Para mejorar el conocimiento sobre la estabilidad física de los depósitos de relave se promueve el estudio de las propiedades geomecánicas. En cambio, para tener un mayor control del equilibrio químico de los depósitos, debe existir un énfasis en la composición mineralógica de los relaves y medidas preventivas o reactivas para minimizar la acidificación del depósito.

En cuanto a la estabilidad física de los depósitos de relaves, se han reconocido en el tiempo distintos mecanismos de falla, entre los cuales encontramos; licuefacción del prisma resistente (muro), inestabilidad de taludes (condiciones estáticas o sísmicas), deformaciones excesivas, overtopping, vaciamiento, piping o tubificación, inestabilidad del suelo de fundación, y planos de falla por precipitaciones o erosión eólica (Azam & Li, 2010; Davies, 2002; Espinace, 2015; Klohn, 1997; Rico et al., 2008; Villavicencio et al., 2014).

A lo largo de la historia existen variados casos emblemáticos sobre desastres medioambientales producto de fallas en tranques de relaves, ya sea en el ámbito internacional como en el contexto nacional. Se estima que la cantidad de relaves mineros en el mundo son más de 18400 y ocurrieron 198 fallas antes del año 2000 y 20 fallas entre el 2000 y 2010 (Azam & Li, 2010).

A modo de ejemplo, internacionalmente tres de los casos más recientes son en primer lugar el colapso el año 2014 de parte del prisma resistente del tranque de relaves de la mina cobre y oro “Mount Polley”, propiedad de Imperial Metals, ubicada en British Columbia, Canadá, en segundo lugar el colapso del depósito “Fundão” perteneciente a la mina “Germano”, en el subdistrito de Bento Rodríguez, estado de Minas Gerais, Brasil, en el año 2015, y más recientemente el colapso del depósito “Brumadinho” perteneciente a una mina de hierro, llamada “Córrego do Feijão” ubicada en el municipio de Brumadinho perteneciente al estado de Minas Gerais igualmente, en el año 2018.

A nivel mundial Chile se encuentra con un bajo número de incidentes en relación con países como Estados Unidos, el cual posee a la actualidad más de 30 fallas de depósitos (Azam and Li, 2010). Una alta actividad sísmica en Chile junto con la existencia de numerosos depósitos de relave asociados principalmente a la industria del cobre ha generado una historia de falla en depósitos de relaves desde principios del Siglo XX hasta hoy en día (Villavicencio *et al.*, 2014c).

En el ámbito nacional, existen registros históricos como por ejemplo el colapso de la presa de relaves “Barahona N°1”, que falló durante el terremoto del 1 de diciembre de 1928, perteneciente a la mina “El Teniente”. Años más tarde, el desastre desatado producto del terremoto de la Ligua en el año 1965, en donde el depósito de relaves “El Cobre” perteneciente a la actual mina “El Soldado” ubicado en las cercanías de Caldera tras su colapso produjo un centenar de muertes. De igual forma, casos más recientes asociados al terremoto del año 2010 o a los aluviones del año 2015 produjeron colapsos y posteriores escurrimientos de relaves en las localidades de las Palmas y Chañaral, respectivamente (Medvinsky-Roa et al., 2015; Troncoso et al., 2017; Villavicencio et al., 2014).

Cabe destacar que, en todos los casos mencionados, tanto internacionales como nacionales, las pérdidas humanas son lamentablemente numerosas, como también el costo económico asociado a medidas de reparación como de mitigación son extraordinarios y además existe un gran daño medioambiental asociado (Villavicencio *et al.*, 2014c).

En la Figura 3 se detallan las estadísticas de falla a nivel mundial de depósitos de relaves convencionales entre los años 1800 y 2000 (Icold, 2016)

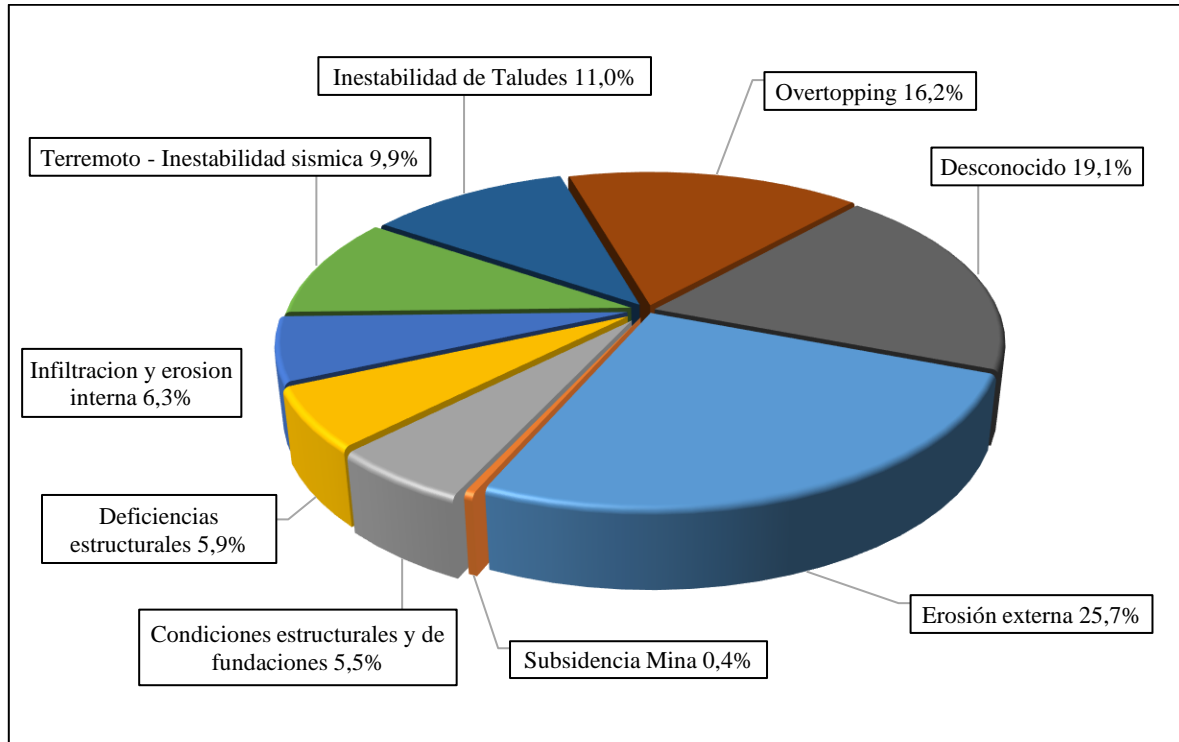


Figura 3.- Incidentes según modo de falla en depósitos de relave a nivel mundial. Modificado de Icold (2016).

En la Figura 3 se observa que el efecto de la erosión externa abarca el mayor nivel porcentual de las fallas analizadas por Icold (2016), seguido de las causas desconocidas, el overtopping, y la inestabilidad de taludes. Es en este último punto, donde la presente investigación tiene como objetivo aportar en la caracterización de la estabilidad física de los tranques de relaves, no incluyendo aportes en el equilibrio químico de estos. Para lograr un equilibrio químico de los tranques de relaves se utilizan técnicas como; relaves inocuos, diseño operacional del depósito, inundación del depósito, aislación impermeable de la superficie del depósito, y desarrollo de biomasa sobre el depósito de relaves. (SERNAGEOMIN, 2020c)

2.7 Depósitos en Chile

El “Departamento de Depósitos de Relaves”, perteneciente al “Servicio Nacional de Geología y Minería” (SERNAGEOMIN), entre sus labores tiene la tarea de recopilar información asociada a los depósitos de relave, mediante la realización de un catastro anual. La fecha del último catastro informado fue el 10 de agosto de 2020 (SERNAGEOMIN, 2020a). Se estima que las faenas mineras actuales generan relaves a una tasa de 530 millones de toneladas al año, cubriendo extensas áreas que hasta la fecha acumulan 24 mil millones de toneladas, de las cuales cerca de un 3% corresponden a la producción asociada a la pequeña y mediana minería, (SERNAGEOMIN, 2019).

Según lo calculado a partir del catastro nacional de depósitos de relaves vigente, la cifra de relaves en Chile se estima cerca de 757, de los cuales 112 están activos, 467 inactivos, 5 en construcción y 173 se encuentran en estado de abandono (SERNAGEOMIN, 2020b). En la Figura 4 se observa una distribución por región de la cantidad y del estado en que se encuentran los depósitos mencionados, información que difiere levemente con la informada entregada en el último catastro nacional.

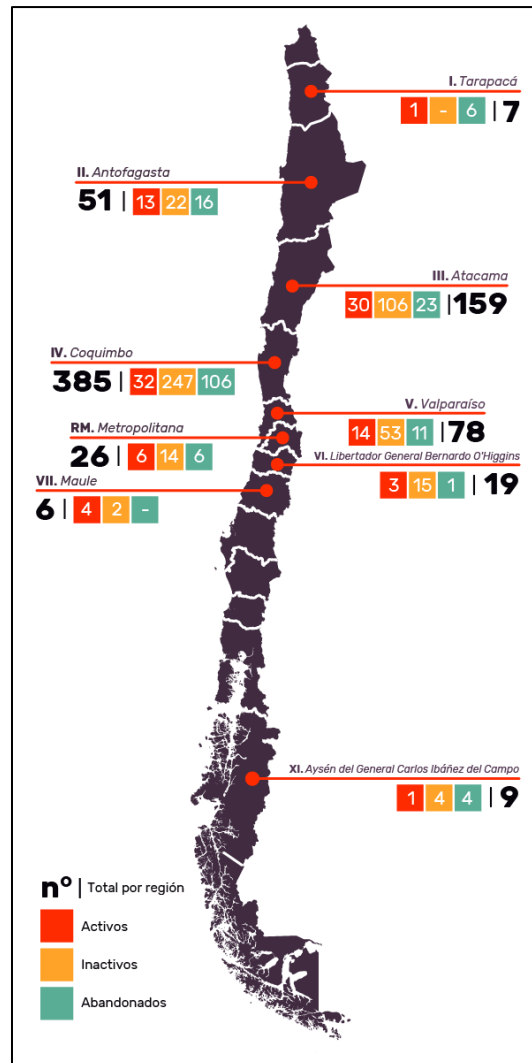


Figura 4.- Distribución regional de relaves en Chile.
Fuente: www.relaves.org, extraída en agosto 2021.

Producto de que no existe una definición clara en la legislación vigente sobre las operaciones mineras que corresponden a la mediana o a la pequeña minería y además el mencionado catastro anual no incluye este campo dentro de su análisis, resulta difícil establecer una estadística clara de cuantos de los relaves mostrados en la Figura 4 pertenecen a la mediana y pequeña minería.

Aunque, con el objetivo de entregar una mirada de las proporciones de los distintos sectores productivos se puede tomar en cuenta la definición que aplica el “Instituto de Ingenieros de Minas de Cobre” y la “Sociedad nacional de minería” (SONAMI) para diferenciar este sector productivo entre la gran minería, la mediana minería, y la pequeña minería en función de las toneladas de extracción de mineral (SONAMI, 2014), clasificación que se muestra en la Tabla 2. Cabe mencionar que el SERNAGEOMIN por su parte realiza una definición de los distintos sectores productivos solamente en base a trabajadores y horas trabajadas.

Tabla 2.- Definiciones utilizadas por Sonami para los sectores productivos.
Fuente: Tabla N°1 (SONAMI, 2014)

Sectores	Extracción de mineral	
	Ton / año	Ton Equiv. / mes
Gran Minería	Sobre 3.000.000	Sobre 250.000
Mediana Minería	100.000 – 3.000.000	8.000 – 250.000
Pequeña Minería	Menor a 100.000	Menor a 8.000

En función de la clasificación de la Tabla 2 existe información disponible al año 2014, sobre un total de 53 nuevos proyectos con una inversión total de aproximadamente MMUS\$ 105 solo en proyectos asociados a la mediana minería proyectada entre los años 2014 a 2023, inversión que se distribuye en alrededor de una treintena de compañías (Comisión Chilena del Cobre, 2014). Con el objetivo de establecer una comparación con la gran minería, este sector entre los años 2020 a 2029 considera una proyección de 31 nuevos proyectos sustentados con una inversión total de MMUS\$ 42.811.

En la Figura 5 se observa la información del registro nacional categorizada en función de la tecnología de depositación. De la totalidad de los depósitos según el catastro nacional, 606 corresponden a tranques, 122 a embalses, 16 depósitos de relaves filtrados, 6 depósitos de relaves espesados, 5 a depósitos de relave en pasta, 1 dreim, y 1 pretil.

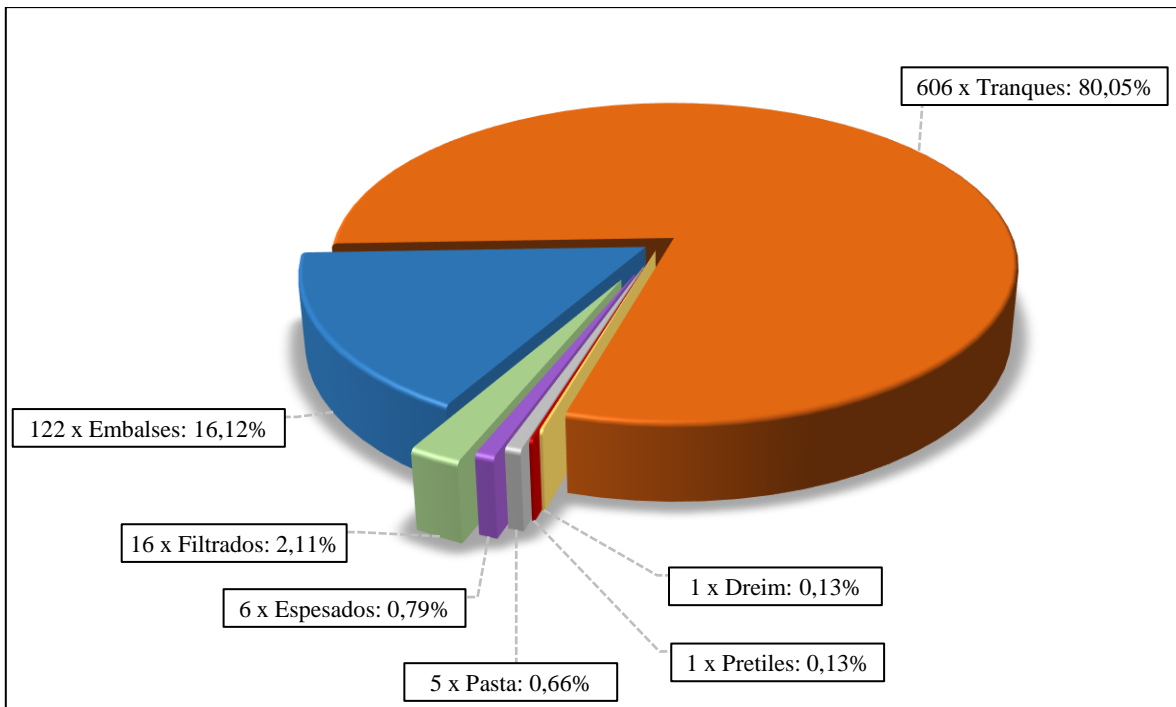


Figura 5.- Proporción de tecnologías de depositación utilizadas en Chile.

Como se observa en la Figura 5, en la actualidad los depósitos de relaves en Chile presentan una distribución por tipo de relaves centrada básicamente en los tranques y embalses de relaves, sin embargo, debido a las ventajas tanto físicas como químicas, de los relaves con bajos contenidos de humedad es de esperar que el futuro de los relaves, tanto a nivel nacional como internacional, se centre en los depósitos con un vertido a contenido de sólidos mayor.

Cabe destacar que en Chile se tiene experiencia utilizando técnicas de desaguado, por ejemplo, se desarrolló una planta piloto en Collahuasi en la región de Tarapacá para relaves espesados, también se utiliza esta técnica en el depósito de la Minera Esperanza en la región de Antofagasta, también la planta “Delta” de Enami en operación desde 2010 ubicada en la comuna de Ovalle, o en la minera “Las Cenizas” ubicada en la región de Valparaíso. Además, existen plantas para relaves en pasta como la planta “Cerrillos” correspondiente a la mina “Carola” ubicada 30 km al sur de Copiapó (Grupo Coemin), o el depósito en pasta “Alhué” correspondiente a la minera “Florida” ubicada en región Metropolitana. En cuanto a relaves filtrados se puede mencionar el depósito de relaves “Doña Rosa” correspondiente a la minera “Toqui” ubicada en la región de Aysen (Galaz, 2011b).

Adicionalmente, se puede mencionar que la gran mayoría de los depósitos de relaves presentes en el territorio nacional de acuerdo con el registro nacional son constituidos como pulpa de relaves producto de la obtención de cobre, seguido de la obtención de oro, y luego plata, molibdeno, y hierro (SERNAGEOMIN, 2020b).

En relación con la capacidad de almacenamiento de los depósitos de relave, es importante diferenciar entre el volumen autorizado y el volumen actual del depósito de relaves. El volumen autorizado corresponde al volumen máximo capaz de recibir el depósito, en cambio, el volumen actual corresponde al volumen depositado a la fecha informado por cada minera

(SERNAGEOMIN, 2007a). De acuerdo con Falcón & Urbano (2016), los depósitos con mayor capacidad aprobada en Chile son los que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Depósitos chilenos con mayor capacidad aprobada. Modificado de Falcón and Urbano (2016).

Depósito*	Faenas	Empresa	R.	Provincia	Comuna	CA
Laguna Seca	Escondida	Minera Escondida	II	Antofagasta	Antofagasta	4500
Talabre	Chuquicamata	CODELCO	II	El Loa	Calama	2104
Ovejería	Andina	CODELCO	RM	Chacabuco	Tiltil	1930
Carén	El Teniente	CODELCO	RM	Melipilla	Alhué	1840
El Mauro	Los Pelambres	Los Pelambres	IV	Choapa	Los Vilos	1700
Sierra Gorda	Sierra Gorda	SCM Sierra Gorda	II	Antofagasta	Sierra Gorda	1350
Pampa Pabellón	Collahuasi	Cía. Minera Doña Inés de Collahuasi	I	Tamarugal	Pica	1040
Las Tórtolas	Los Bronces	Anglo American	RM	Chacabuco	Colina	1000
Esperanza	Esperanza	Cía. Minera Centinela	II	Antofagasta	Sierra Gorda	750
Depósito de Arenas	Caserones	Minera Lumina Copper Chile	III	Copiapó	Tierra Amarilla	570

*: Depósito Activos, R: Región, CA: Capacidad aprobada en millones de toneladas.

Con el objetivo de representar la data presente en la Tabla 3, en la Figura 6 se puede ver la magnitud de los depósitos descritos en base a una comparación respecto al Cerro San Cristóbal ubicado en la ciudad de Santiago. En color negro se destaca la ubicación y envergadura del muro de contención de los distintos depósitos.

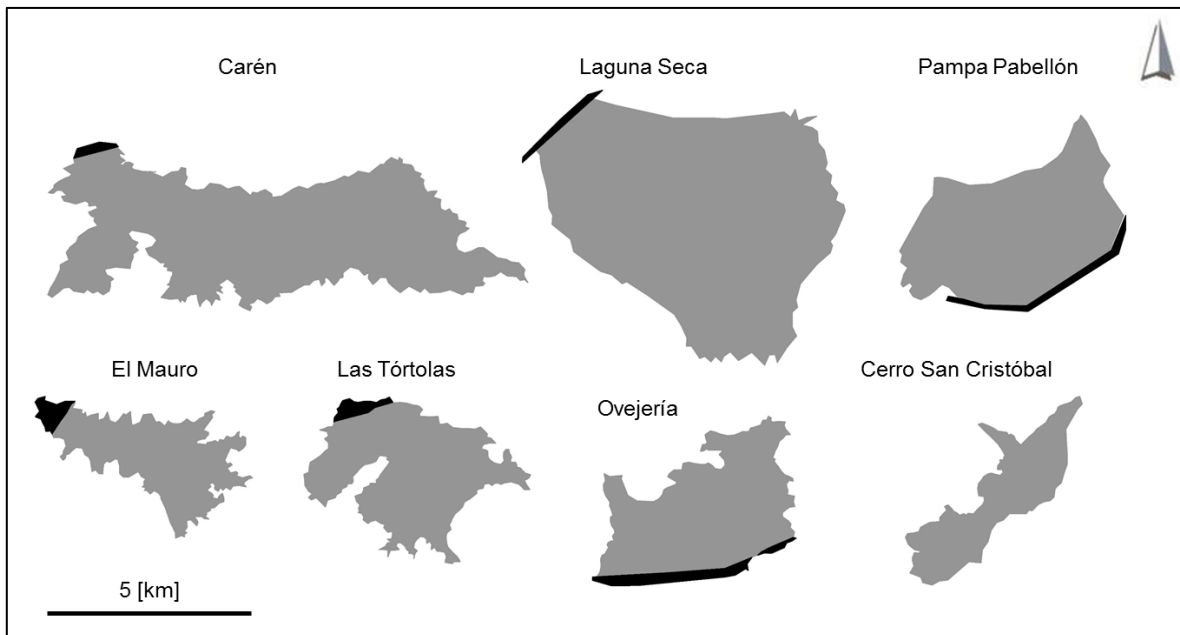


Figura 6.- Vista en Planta de los principales depósitos de relaves en Chile, comparados con el Cerro San Cristóbal, Chile. Carvajal A. and Pastén P (2018).

Capítulo III – Caracterización de relaves

La primera distinción que surge sobre las propiedades de los relaves es en función del tipo de mineral extraído en el proceso minero, es decir, relaves provenientes principalmente de la extracción del Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Oro (Au), Hierro (Fe), y Uranio (U), entre otros (Lottermoser, 2010). Además, existen relaves provenientes del proceso de lavado del Carbón y relaves de arenas petrolíferas provenientes del proceso de obtención del petróleo.

Si bien es correcta esta primera distinción, las características de los relaves tienen una gran variación y existen otros factores que provocan que sus propiedades geotécnicas sean distintas. Por ejemplo, la mineralogía de la arcilla, los procesos físicos y químicos utilizados para extraer el producto económico (Hu *et al.*, 2017).

En términos generales, los relaves convencionales o integrales (relaves no ciclados) provenientes de distintas minas no difieren significativamente con respecto al tamaño de grano, estos relaves principalmente son arenas finas las cuales poseen limos y arcillas. Este efecto es producto de que los procesos de chancado y conminución buscan un tamaño de partícula objetivo definido según el proceso minero, el cual tiende a ser semejante entre las distintas operaciones mineras. Sin embargo, el proceso de transporte posterior puede provocar segregación y laminación (Mlynarek *et al.*, 1995).

Donde en general existe una diferencia clara en términos de propiedades es al comparar lamas y arenas de relaves, ambos materiales provenientes del proceso de ciclados, como se ilustra en la Figura 7. Las arenas de relave en general presentan mejores propiedades resistentes in situ en comparación a las lamas, producto de la compactación que se realiza en su depositación (Witt *et al.*, 2004).

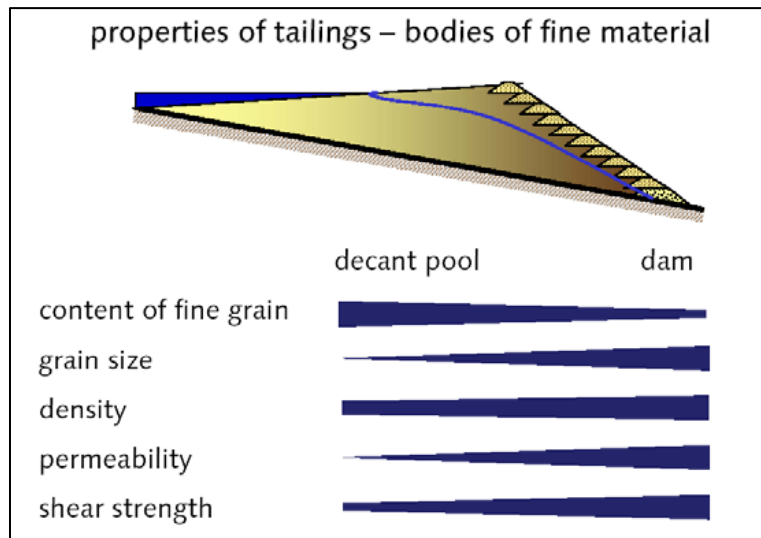


Figura 7.- Behaviour of soil characteristic quantities in dependency of the spilling location. Witt et al. (2004).

Las arenas de relave se encuentran generalmente en condiciones de drenaje distintas a las lamas, ya que en la operación de los depósitos se procura mantener el muro de arenas sin infiltraciones de agua que provoquen la saturación del prisma resistente (Rodríguez & Oldecop, 2011; SERNAGEOMIN, 2007; Villavicencio et al., 2011, 2014). A diferencia de las lamas, donde estas últimas al ser materiales principalmente arcillosos y con baja permeabilidad no permiten el drenaje a corto plazo (Hu et al., 2017).

3.1 Variables de estado

Para el diseño de los depósitos se debe controlar el estado tensional y el estado deformacional de los relaves, estos estados están asociados por ejemplo a la resistencia al corte o al efecto de consolidación de los relaves. Estas propiedades pueden variar dependiendo de las condiciones en las cuales se encuentren inmersos los relaves. Entre estas condiciones destacan la densidad, la humedad, y las tensiones efectivas, las cuales se definen como variables de estado ya que pueden variar de un punto de prospección a otro.

3.1.1 Índice de vacíos

El índice de vacíos tiene un rol importante en el diseño de los tranques ya que existen causas que puede provocar variabilidad en este, por ejemplo, el proceso de secado natural de un depósito o la metodología de depositación del relave utilizada durante la operación del depósito.

En los suelos la razón del volumen de vacíos al volumen de sólidos conocida como índice de vacíos es importante, en particular en los relaves es importante porque durante la operación de los depósitos de relave este índice varía. Esta variación en el caso de los relaves finos depositados en la cubeta o en el caso de relaves espesados, se deben principalmente a una densificación provocada por el efecto conjunto del secado bajo condiciones climáticas locales y posterior consolidación bajo una capa nueva de relave. El mismo mecanismo de variación afecta a la densidad seca (Zuñiga & Suazo, 2019).

3.1.2 Humedad

Para mejorar la trabajabilidad de los relaves en su conducción previa a su depositación se recurre a variar los contenidos de agua de la pulpa de relaves. Una solución de relaves o pulpa de relaves con una cantidad suficiente de agua se comportará como un fluido viscoso, y en la medida que disminuya el contenido de agua en la solución o pulpa de relaves, aumentará su viscosidad (Ramírez, 2007).

Por lo tanto, la humedad del relave varía desde que este sale del proceso de flotación del mineral hasta que el relave llega a su lugar de depositación. Además, dependiendo del tiempo y de las etapas de depositación, la humedad puede variar considerablemente en un mismo depósito de relaves dependiendo de en qué lugar del depósito se mida.

Al considerar que la humedad de saturación es una propiedad que depende del tipo del suelo y del estado de densidad de este, el rango de humedades a analizar debe ser definido para cada material en particular.

Por último, la humedad juega un rol importante cuando se evalúa la estabilidad física del depósito, ya que el comportamiento que este tenga dependerá en parte por la humedad que tengan los relaves depositados, lo que se verá reflejado en una respuesta drenada o no drenada ante alguna sollicitación.

3.1.3 Tensión efectiva

La tensión efectiva también se puede considerar una variable de estado, ya que un aumento de la tensión efectiva aumenta la presión de confinamiento, lo cual en términos de resistencia al corte mejora su respuesta. Por otro lado, los cambios de volumen que pueden llegar a experimentar los suelos al ser sometidos a esfuerzos externos dependen de la tensión efectiva que estos tengan inicialmente y de su densidad o compacidad, lo que tendrá como resultado comportamientos dilatantes o contractivos.

3.2 Base de datos de relaves analizados

Los relaves seleccionados e incluidos en los análisis de la presente investigación corresponden a relaves ya estudiados en investigaciones realizadas por más de 15 autores, las cuales corresponden a los trabajos más completos y afines con el propósito del presente documento. No se ha incluido la presentación de resultados de más de 100 investigaciones analizadas producto de que la data de estas investigaciones en muchos de los casos es incompleta o insuficiente, principalmente en aspectos como; descripción sobre la procedencia de relaves, falta de incorporación de las propiedades índice, estudios que incluyen modificaciones de los relaves, entre otros factores.

Los relaves considerados son provenientes en su mayoría de tranques de relaves, incluyendo en menor medida los provenientes de embalses de relaves, relaves en pasta y relaves filtrados.

Por otro lado, la mayoría de los relaves son resultantes de la extracción solo de Cobre o de Cobre más algún mineral adicional, dependiendo de la mineralogía de la mina.

En particular, los relaves estudiados por Musso & Suazo (2018), Zuñiga & Suazo (2019), Alemany & Suazo (2019), Yáñez & Suazo (2022), Arredondo & Suazo (2022), Ramírez &

Suazo (2022), y Sánchez & Suazo (2022) corresponden a relaves extraídos principalmente de tranques de relaves provenientes de minas de cobre a menos que se indique lo contrario.

3.3 Nomenclatura utilizada

Para la correcta visualización de tablas y gráficos presentados en los apéndices siguientes se define abreviar las arenas de relaves, las lamas, y los relaves integrales con las letras “A”, “L”, e “I”, respectivamente.

Además, la palabra “Relave” se abrevia con la letra “R” y se ha definido un subíndice de numero entero “i” para enumerar y diferenciar los distintos relaves analizados en una misma proyecto. Por ejemplo, “R₁”, “R₂”, y “R₃”, para referirse a tres relaves contenidos en una misma investigación.

3.4 Banda granulométrica

Las curvas granulométricas de los relaves estudiados fueron determinadas bajo la normativa nacional “Método para determinar la Granulometría, NCh 3236 of.10” (INN, 2010) y/o a la normativa internacional “Granulometría por tamizado y sedimentación, ASTM D 422” (ASTM, 2007).

En la Figura 8 se muestra la banda granulométrica de la base de datos analizada según el tipo de material. Se presentan las arenas de relave en color verde, los relaves integrales en color azul, y las lamas en color amarillo.

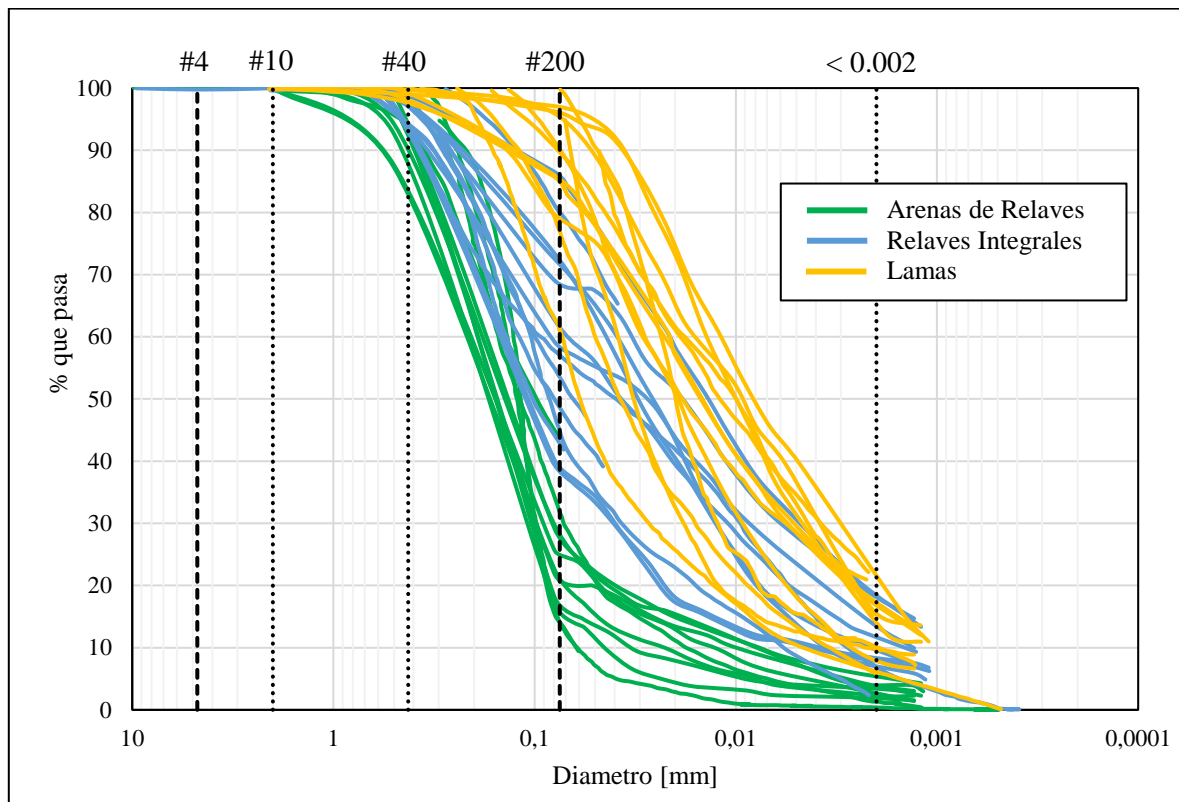


Figura 8.- Recopilación de granulometrías de relaves provenientes de minas de Cobre.
Fuente: Elaboración propia.

En las arenas de relave analizadas se observa que el diámetro efectivo D_{80} se encuentra entre el tamiz #40 (0,425 mm) y el tamiz #100 (0,150 mm), para los relaves integrales varía entre los tamices #50 (0,300 mm) y #200 (0,075 mm), en cambio para las lamas el D_{80} abarca desde el tamiz #100 hasta un diámetro de 0,025 mm. Para el caso del diámetro efectivo D_{60} , las arenas de relave se concentran alrededor del tamiz #80 (0,180 mm), los relaves integrales se encuentran entre el tamiz #80 y hasta un diámetro de 0,020 mm, y las lamas varían desde 0,010 hasta 0,040 mm. Para el caso del D_{30} las arenas de relave están cercanas al tamiz #170 (0,090 mm), los relaves integrales varían entre 0,004 y 0,040 mm, y las lamas entre 0,003 y 0,020 mm. Por último, el diámetro efectivo D_{10} para las arenas de relave se encuentra entre 0,006 mm y el tamiz #200, en cambio para los relaves integrales y las lamas es menor a 0,004 y 0,003 mm, respectivamente.

De acuerdo con las curvas granulométricas de los distintos tipos de relaves mostrados en la Figura 8, sumado a los rangos obtenidos para los diámetros efectivos analizados (D_{10} , D_{30} , D_{60} , y D_{80}), se observa que según la tipología del relave (arenas de relave, relaves integrales, y lamas) estos se pueden agrupar en 3 distintas bandas granulométricas. Las cuales se atribuyen principalmente al proceso de cicloneo de los relaves. En particular, en la Figura 8 se observa que estas bandas granulométricas se visualizan bien definidas para cada uno de los tipos de relaves.

En las Figura 9, Figura 10, y Figura 11, se presentan las bandas granulométricas para cada material por separado.

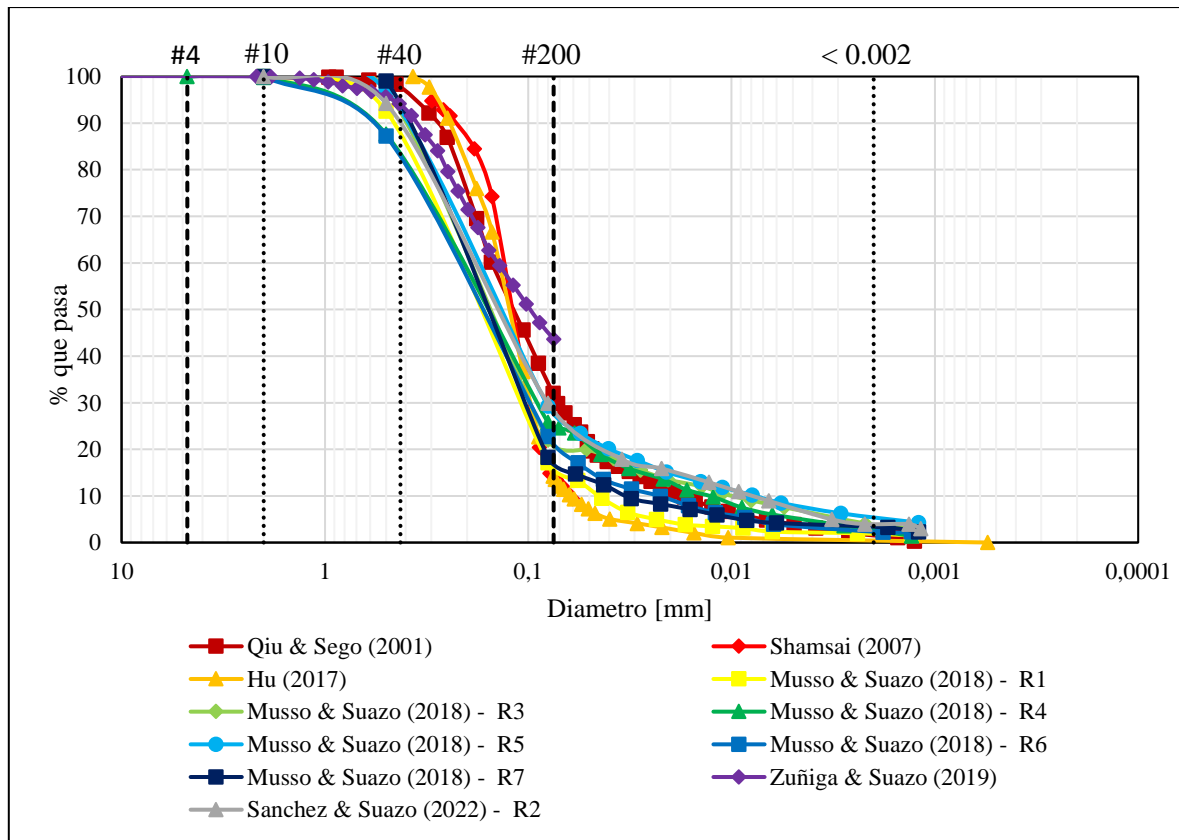


Figura 9.- Banda granulométrica de arenas de relaves.

En la Figura 9 se observa que las arenas de relaves poseen una banda granulométrica estrecha y muy bien definida, es decir, esta es relativamente homogénea con características similares en promedio en cuanto al coeficiente de uniformidad ($C_u \approx 9$) y curvatura ($C_z \approx 2,3$). Se aprecia que todas las arenas no tienen arenas gruesas, es decir, no poseen granos de tamaños mayores al tamiz #10. Además, no exhiben gran contenido de arenas de tamaño medio ya que al menos el 80% del suelo pasa por el tamiz #40. En cambio, se observa que las arenas de relave se componen de un mayor contenido de arenas finas cercanas al 60%, seguido de un contenido de limos entorno al 15% y un porcentaje inferior al 5% de contenido de arcillas.

En particular, Hu et al. (2017) plantea que las arenas de relave son suelos mal graduados clasificadas como ML, pero de acuerdo con lo observado en la Figura 9, en general, las arenas analizadas son suelos con una granulometría discontinua, ya que se distinguen dos fracciones bien graduadas, las cuales se concentran aproximadamente entre los tamices #10 y #50 (entre 0,3 a 2 mm), y para suelos finos bajo el tamiz #200 (0,075 mm).

En relación con contenido de finos, se observa en la Figura 9 que este varía entre un 10% a 30% dependiendo del relave analizado. La proporción de finos se observa bien graduada, conformada principalmente de limos, entre el 85% hasta cerca del 100% del contenido de finos, seguido de un mínimo porcentaje cercano a 0% hasta un 15% de los finos para el caso de las arcillas.

Las lamas mostradas en la Figura 10 muestran en general un contenido de arenas finas entre el 5% al 35%, un contenido de limos entre el 50% a 90%, y un contenido inferior al 20% de arcillas. Las lamas presentan una distribución de tamaño de grano bien graduada, las cuales clasifican generalmente como CL, clasificación de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) (ASTM, 2017a).

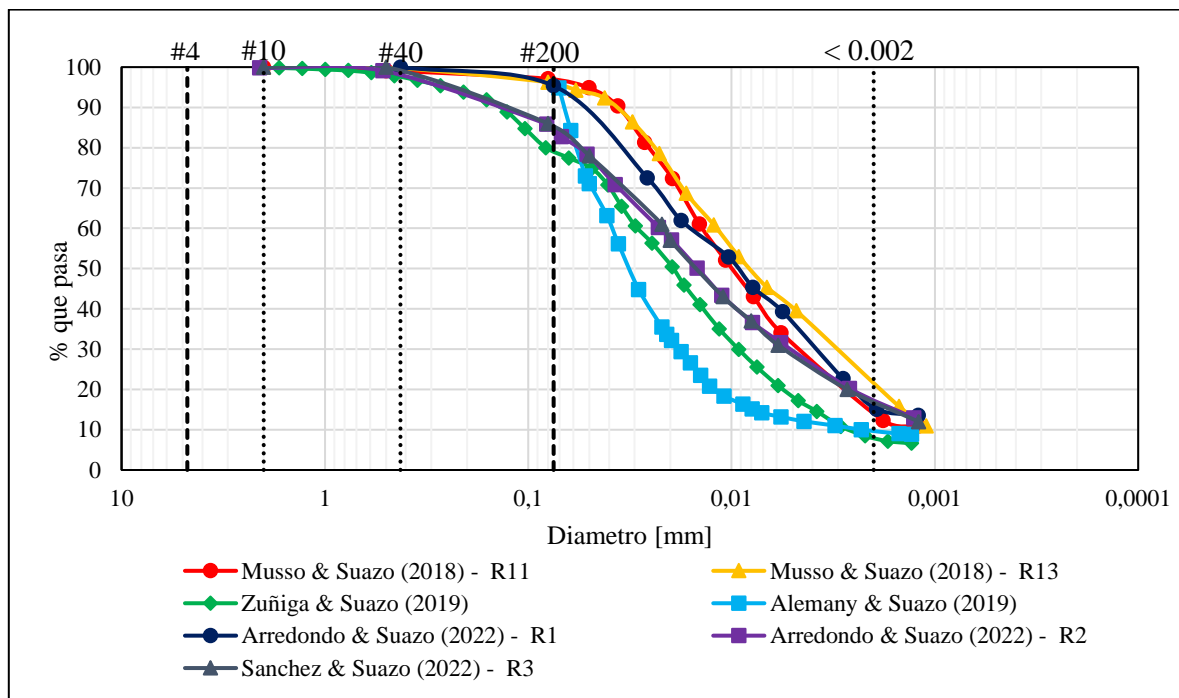


Figura 10.- Banda granulométrica de Lamas.

Por último, en la Figura 11 se muestran solo los relaves correspondientes a relaves integrales o relaves pre-ciclonados mostradas en la Figura 8. Cabe recordar que los relaves integrales analizados corresponden a muestras de suelo extraídas desde las cubetas de los depósitos que operan depositando este tipo de relaves directamente en la cubeta, o bien muestras extraídas previo al ciclonaje del relave. Se observa que la banda granulométrica de los relaves integrales es más amplia en comparación a la que se observa para el caso de las arenas de relaves y las lamas, Figura 9 y Figura 10, respectivamente. Al igual que en el caso de las arenas de relave, se aprecia que todos los relaves integrales analizados no tienen arenas gruesas y tienen un pequeño contenido de arenas de tamaño medio, pero se componen mayoritariamente de contenido de arenas finas entre 15% y 60%, seguido de un contenido de limos entorno al 25% y un porcentaje inferior al 15% de contenido de arcillas

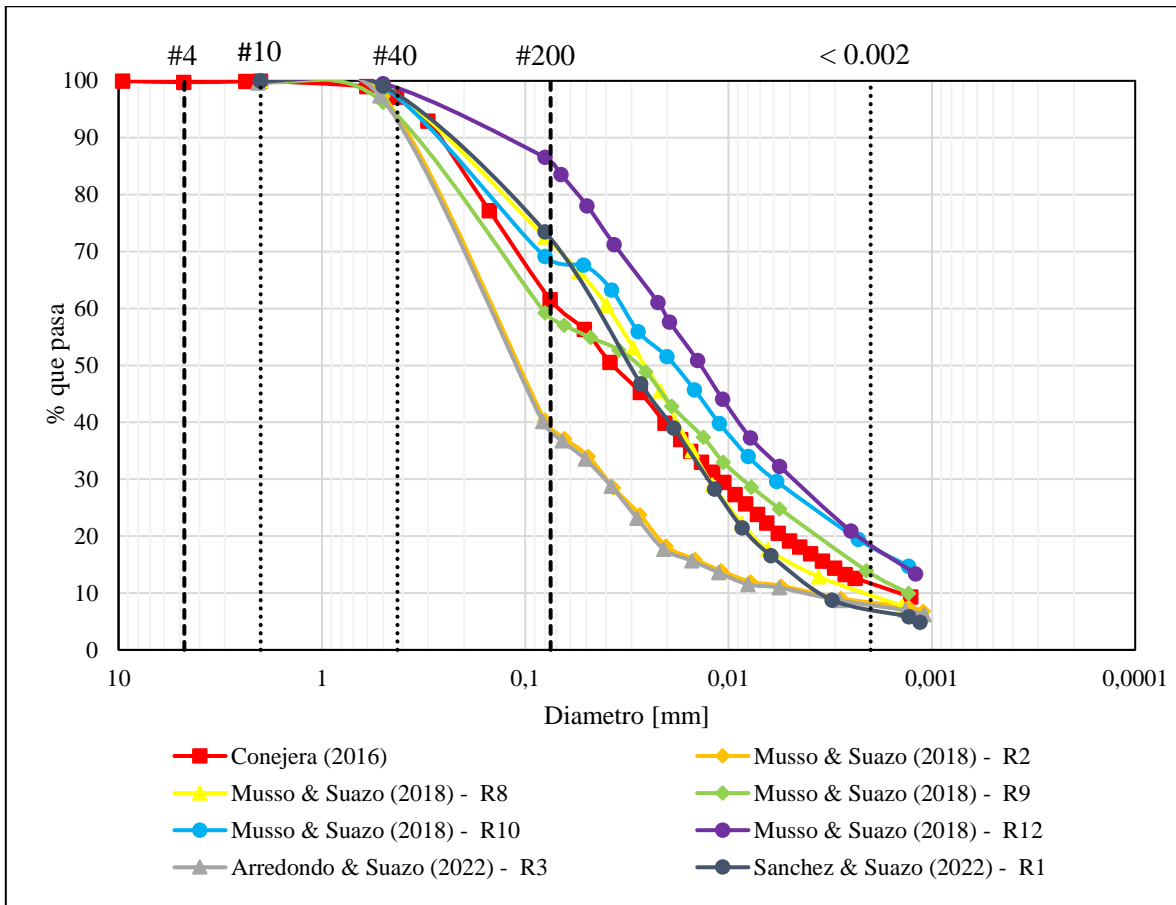


Figura 11.- Banda granulométrica de relaves integrales.

3.4.1 Clasificación de suelos

Para definir el tipo de suelo correspondiente de los relaves estudiados se recurre a la normativa internacional “Clasificación de Suelos, ASTM D 2487” (ASTM, 2017a).

Con respecto a la clasificación de suelos de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) (ASTM, 2017a), las arenas de relaves clasifican generalmente como SM (Arenas limosas), las lamas clasifican como CL y/o ML (Limos o Arcillas de mediana a baja plasticidad) dependiendo de su carta de plasticidad, y los relaves integrales clasifican como

SM, ML o CL, dependiendo de la cantidad de finos que posean y que nivel de plasticidad tengan estos mismos.

3.5 Parámetros geotécnicos

La Tabla 4 muestra una recopilación de caracterización geotécnica en donde se pueden apreciar algunos rangos típicos para cada parámetro, entre ellos, la gravedad específica (G_s), la relación de vacíos (e), rango de pesos específicos (γ), el contenido de humedad (w), el índice de plasticidad (PI), el contenido de finos (CF), y la clasificación de suelos de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) (ASTM, 2017a).

Tabla 4.- Recopilación propiedades geotécnicas de relaves provenientes de minas de Cobre.

Tipo	G_s [-]	e [-]	γ [kN/m ³]	w [%]	PI [%]	CF [%]	Tipo (USCS)	Referencia
A	2,6-2,8	0,60-0,80	15,6-17,5	-	-	-	-	(Volpe, 1975)
A	2,75	0,49-0,54	17,8-18,7	14,0	17,5	31,3	SM	(Qiu & Segeo, 2001)
A	2,83	0,80-1,27	12,2-15,4	-	-	-	SM	(Bhanbhro, 2014)
A	2,65	0,55-1,21	-	-	-	15,0	SM	(Solans, 2010)
A, R_1	2,73	0,41-1,10	17,0	13,5	-	18,0	SM	(Campaña, 2011)
A, R_2	2,72	0,52-1,33	16,8	13,1	-	15,8	SM	(Campaña, 2011)
A, R_3	2,70	0,50-0,95	17,8	12,5	-	15,0	SM	(Campaña, 2011)
A, R_4	2,69	0,53-1,16	17,7	11,5	-	24,6	SM	(Campaña, 2011)
A	2,77	0,78	14,3	39,0	-	14,2	SM	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
A, R_1	2,83	0,52-0,94	14,3-17,6	13,4	NP	16,3	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_3	2,86	0,85-1,21	12,7-15,9	14,3	NP	21,7	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_4	2,73	0,55-1,04	13,15	-	NP	25,0	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_5	3,07	0,61-0,93	15,6-19,3	15,6	NP	28,7	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_6^*	2,70	0,52-0,96	13,5-17	15,36	NP	21,7	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_7	2,90	0,67-1,06	13,8-18	13,82	NP	16,6	SM	(Musso & Suazo, 2018)
A	3,09	-	12,3-18,2	15,3	-	-	SM	(Zuñiga & Suazo, 2019)
L	2,83	0,72-1,41	11,6-16,2	-	-	-	CL	(Bhanbhro, 2014)
L	2,76	0,89	14,3	67,0	15	61,1	CL	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
L	2,7-3,0	-	-	-	0-11	-	-	(Mittal & Morgenstern, 1976)
L	2,6-2,8	0,90-1,40	20,3-26,3	-	13	-	-	(Volpe, 1975)
L	3,88	0,60-1,16	-	-	4,3	-	-	(Geremew & Yanful, 2012)
L**	2,78	0,56	-	-	NP	97	-	(Wijewickreme et al., 2005)
L***	3,4-4,4	0,59-1,72	-	-	2	70	-	(Wijewickreme et al., 2005)

Tipo	G_s [-]	e [-]	y [kN/m ³]	w [%]	PI [%]	CF [%]	Tipo (USCS)	Referencia
L, R_{11}	2,90	1,1-1,79	10,2-18	15,47	10,6	96,8	CL	(Musso & Suazo, 2018)
L, R_{13}	3,17	1,21-2,22	9,6-17,7	15,53	14,1	95,9	CL	(Musso & Suazo, 2018)
L	3,09	-	12,3-18,2	15,3	-	-	ML	(Zuñiga & Suazo, 2019)
L	2,89	-	22,6	-	2,0	-	SM-ML	(Alemany & Suazo, 2019)
L, R_1	3,02	-	10,9-17,7	43,28	13	-	CL	(Arredondo & Suazo, 2022)
L, R_2 ''	3,02	-	16,4-18,7	23,96	5	87	CL-ML	(Arredondo & Suazo, 2022)
L''	3,02	0,97-1,36	12,6-19,9	15,38	28	87	CL	(Sánchez & Suazo, 2022)
I	2,79	0,4-1,0	17,5	14,18	6	45	-	(Shamsai <i>et al.</i> , 2007)
I'	2,81-2,84	0,73-1,21	12,4-16,1	-	-	-	-	(Bjelkevik & Knutsson, 2005)
I	2,78	0,67-1,39	-	-	NP	55	ML	(Verdugo & Santos, 2009)
I	2,73	-	10,7-20,2	10,0	3,2	61,1	ML	(Conejera, 2016)
I, R_2	3,12	0,96-1,34	13-18,1	16,3	2,0	39,4	SM	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_8	2,71	0,69-1,09	12,8-17,6	15,55	4,4	73,3	ML-CL	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_9	2,79	0,91-1,47	11,1-18,1	15,51	4,9	58,4	ML-CL	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_{10} ''	2,83	0,71-1,86	9,7-17,6	17,12	6,9	69,3	ML-CL	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_{12} **	3,02	0,97-1,36	12,6-19,9	15,38	12,5	86,5	CL	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_3	3,12	0,96-1,34	13,0-18,1	16,30	2,0	39,4	SM	(Arredondo & Suazo, 2022)

A = Arenas de relave // L = Lamas // I = Integral (Relave pre-ciclado) // R_i , $i = 1, \dots, n$: Relave i analizado por el mismo autor // *: Mina de Cu y Mo // **: Mina de Cu y Au // ***: Mina de Cu, Au, y Zn // *: Mina de Cu, Au, y Ag // *: Mina de Au // NP = No Plástico // -: Sin información

3.5.1 Gravedad específica

Para determinar la gravedad específica de los relaves estudiados se recurre a la normativa nacional “Densidad de partículas sólidas, NCh 1532 of.80” (INN, 1980a) e internacional “Gravedad específica, ASTM D 854” (ASTM, 2014).

Como se muestra en la Tabla 4, la gravedad específica permanece en un rango relativamente estrecho entre 2,6 y 3 para el caso de las arenas de relaves. En cambio, para las lamas existe una mayor dispersión, ya que se observan valores entre 2.6 y 4,4. Por último, con valores cercanos a 3, entre 2,8 y 3,1, se registran valores de gravedad específica para el caso de los relaves integrales.

3.5.2 Densidad mínima y Proctor

Para determinar la densidad mínima de los relaves estudiados se recurre a la normativa nacional “NCh 1726 Of.80” (INN, 1980b) y normativa internacional “ASTM D4254-16” (ASTM, 2016c). En cambio, para determinar la densidad seca máxima como también el contenido de humedad óptimo, se recurre a la normativa nacional “NCh 1534/1 Of.08” y

“NCh 1534/2 Of.08” (INN, 2008a, 2008b) y a la normativa internacional “ASTM D698-21” (ASTM, 2021).

Cabe destacar que los valores presentados en la Tabla 4 están en términos del peso específico en vez de densidades determinadas. Además, se muestran los rangos de valores correspondientes para la relación de vacíos (e).

Con respecto a los pesos específicos mostrados en la Tabla 4, para el caso de las arenas de relaves se muestran valores mínimos desde 12,2 hasta 17,8 y valores máximos desde 15,4 hasta 19,3. Para el caso de las lamas se observan valores mínimos entre 9,6 y 20,3, pero valores máximos desde 16,2 hasta 26,3. Por último para el caso de los relaves integrales los valores mínimos rondan desde 9,7 hasta 13,0, y para los valores máximos entre 16,1 hasta 19,9. Todos los valores descritos están en kN/m^3 , y no se consideran en el análisis los datos que no se posee información respecto a que peso específico corresponde.

3.5.3 Límites de consistencia

El índice de plasticidad (PI) de los relaves mostrados en la Tabla 4, se determina en función del límite líquido y límite plástico. Para el cálculo de estos límites se recurre a las normativas nacionales “Método para determinar los límites de consistencia, NCh 1517/1, NCh 1517/2 of 1979” (INN, 1979a, 1979b), y a la normativa internacional “Límites de Atterberg, ASTM D 4318” (ASTM, 2017b).

En la Figura 12 se presenta una carta de plasticidad, la cual incluye los índices de plasticidad de los relaves descritos en la Tabla 4.

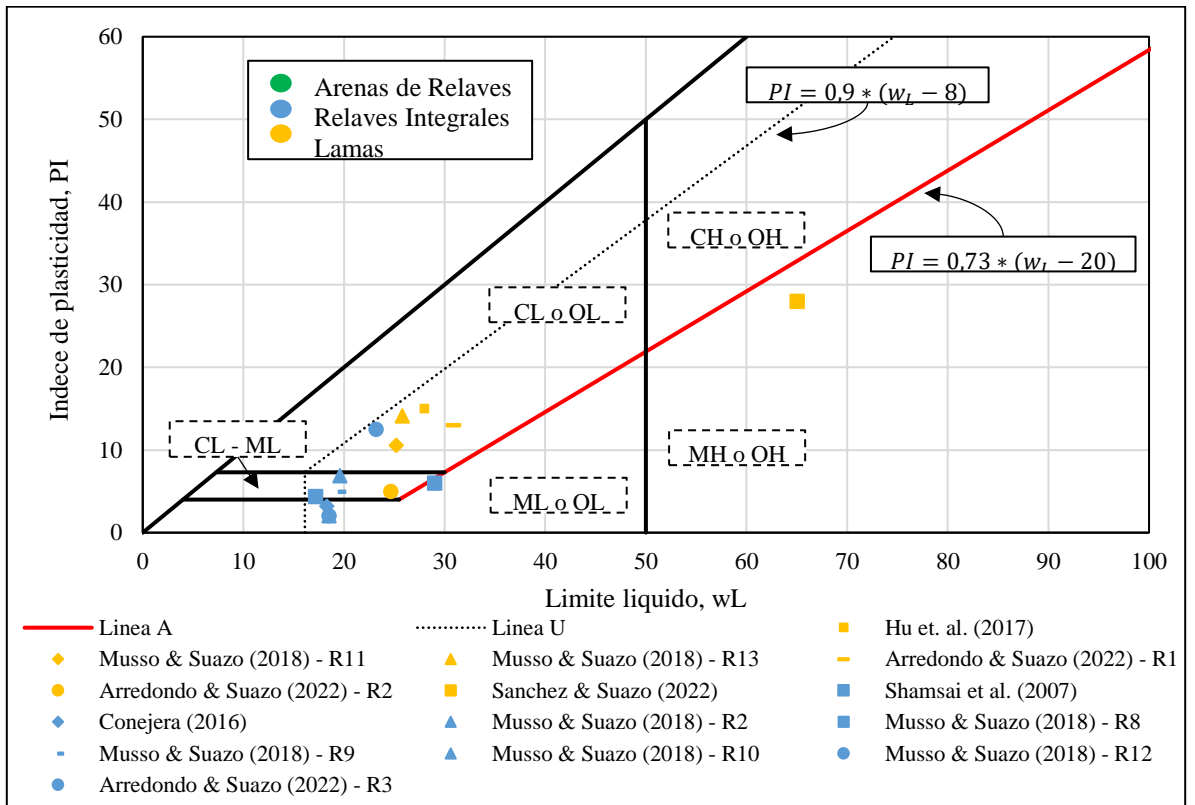


Figura 12.- Carta de plasticidad de relaves analizados.

Como se observa en la Figura 12 los relaves tienen una baja a nula plasticidad, ya que presentan valores para índice de plasticidad por debajo de un $PI = 15$, a excepción del relave de presentado por Sánchez & Suazo (2022) en donde se observa una plasticidad mayor, la cual se atribuye al origen y mineralogía de este relave, el cual proviene de un tranque de relaves de una minera de extracción de oro, ubicada en la provincia de Elqui, región de Coquimbo.

En general las arenas de relaves clasifican como no plásticas, al igual que los relaves integrales o pre-ciclonados (Qiu & Segó, 2001; Shamsai et al., 2007; Verdugo & Santos, 2009; Vick, 1990). En cambio, las lamas pueden exhibir baja plasticidad, como se puede observar en los índices de plasticidad presentados en la Tabla 4.

3.5.4 Mineralogía

La mineralogía del suelo juega un rol importante en la plasticidad del material, como también en su propia granulometría. De acuerdo con lo mostrado en la Figura 8, se observa que la granulometría de los distintos relaves generalmente se encuentra dentro de los márgenes de una banda granulométrica establecida, con la excepción en cierto casos donde el mineral explotado en el proceso minero presenta una mineralogía especial, por ejemplo, suelos que contienen minerales como la lutita, la cual produce un alto contenido de arcilla (Vick, 1990).

En cuanto a la mineralogía de los relaves de cobre, de acuerdo con los resultados del análisis de difracción de rayos X obtenido por Qiu & Segó (2001), donde los relaves evaluados corresponden a la mina “Bingham Canyon”, ubicada en el condado de Salt Lake, Utah, propiedad de la compañía “Kennecott Mining”, se observa que los principales minerales presentes son la clorita, illita, cuarzo y piritita (Qiu & Segó, 2001).

3.6 Coeficiente de permeabilidad y consolidación

Para determinar el coeficiente de permeabilidad y el coeficiente de consolidación de los relaves estudiados se recurre a las normativas internacionales “Permeabilidad de suelos granulares, ASTM D 2434” (ASTM, 2019) y “Propiedades de consolidación” (ASTM, 2011), respectivamente.

La permeabilidad de un suelo está directamente relacionada con el contenido huecos continuos e interconectados presentes que este posea, los cuales permiten que el agua pueda fluir a través de ellos. Al movimiento del agua a través de un suelo o relave se le denomina comúnmente infiltración o filtración y se mide a través de la permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad para un suelo completamente saturado se puede determinar si se tiene conocimiento de la velocidad de descarga (v) y del gradiente hidráulico (i), según la relación mostrada en la ecuación (1). La velocidad de descarga se mide en $[cm/s]$ y el gradiente hidráulico en $[cm/cm]$.

$$k = \frac{v}{i} [cm/s] \quad (1)$$

Para determinar la permeabilidad de un suelo son utilizados dos tipos de ensayos, agrupados en los ensayos de carga constante y los ensayos de carga variable. En ambos tipos de ensayos

se mide el volumen de agua que se infiltra a través del suelo, este flujo de agua es provocado por la presencia de un gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico en el ensayo se genera por la diferencia de carga entre dos extremos distintos de medición para el mismo volumen de suelo.

Para el ensayo de carga constante, la diferencia de carga entre los dos puntos de medición se procura mantener constante ajustando el agua que ingresa a medida que el agua se infiltra en el suelo. En cambio, en el ensayo de carga variable se mide la diferencia de carga producto de la infiltración.

En general los ensayos de carga constante son utilizados para suelos que a priori tienen permeabilidades altas, como suelos conformados principalmente por arenas o que tienen bajo contenido de finos. Por otro lado, para suelos que tienen altos contenidos de finos y por lo tanto es esperable que tengan permeabilidades bajas, es recomendable utilizar ensayos de carga variable para obtener un mejor resultado.

Por otro lado, la consolidación se distingue generalmente entre consolidación primaria y secundaria, en donde la primera se atribuye a la variación en el tiempo entre el esfuerzo vertical efectivo (σ_v') y la presión de poros (u). En donde, producto del drenaje paulatino que experimentan los suelos finos, los cuales tienen por lo general baja permeabilidad, se provoca la disipación del exceso de presión de poros existente generada por una sollicitación inicial. En cambio, la consolidación secundaria se atribuye al ajuste plástico de la estructura de suelo. Ambos tipos de consolidación se asocia a los suelos finos producto de sus bajas permeabilidades y estructura mineralógica, como lo es por ejemplo el caso de las arcillas.

La teoría unidimensional bajo carga constante desarrollada por Terzaghi (1925), propone la ecuación diferencial para la consolidación, en donde el coeficiente de consolidación (C_v) se puede expresar de acuerdo con la ecuación (2).

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} [cm^2/s] \quad (2)$$

En donde, m_v corresponde al coeficiente de compresibilidad del volumen o modulo edometrico, el cual se puede definir según la relación de la ecuación (3).

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e} [kPa] \quad (3)$$

En donde, a_v corresponde al coeficiente de compresibilidad. El cual está dado en el ensayo de consolidación por la pendiente de la secante de la curva esfuerzo (σ) versus relación de vacíos (e), en un intervalo dado de esfuerzos.

En particular el coeficiente de consolidación (C_v) representa los efectos de cambio de volumen de un suelo y la velocidad a la que ocurren dichos cambios de volumen producto de una sollicitación.

En la Tabla 5 se muestra una recopilación de rangos de valores típicos para el coeficiente de consolidación (C_v) y para el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica (k) de relaves provenientes principalmente de minas de cobre.

Tabla 5.- Recopilación propiedades de consolidación y conductividad de relaves provenientes de minas de Cobre.

Relave	k [cm/s]	Tipo ensayo	C_v [cm ² /s]	Referencia
A	$9x10^{-6}$ a $1x10^{-4}$	C	$3,7x10^{-1}$	(Volpe, 1979)
A	$4,5x10^{-5}$ a $9,8x10^{-5}$	C	$7x10^{-3}$ a $3,3x10^{-2}$	(Qiu & Segó, 2001)
A	$2.10x10^{-3}$	V	-	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
A, R_1	$3.40x10^{-4}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
A, R_6^*	$4.02x10^{-4}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
L	$1,5x10^{-7}$ a $1,5x10^{-6}$	-	10^{-3} a 10^{-1}	(Mittal & Morgenstern, 1976)
L	-	C	$1.5x10^{-1}$	(Volpe, 1979)
L	-	-	10^{-4} a 10^{-2}	(Shamsai <i>et al.</i> , 2007)
L	$1.00x10^{-5}$	V	$4,4x10^{-6}$	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
L, R_{13}^{**}	$2.79x10^{-7}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
L	$3.75x10^{-5}$	C y V	-	(Alemany & Suazo, 2019)
L, R_2'	$4.56x10^{-7}$	-	-	(Arredondo & Suazo, 2022)
L'	$4.56x10^{-7}$	-	-	(Sánchez & Suazo, 2022)
I***	$1x10^{-6}$ a $2,5x10^{-6}$	C	-	(Bjelkevik & Knutsson, 2005)
I	-	-	$4,3x10^{-2}$ a $6,6x10^{-1}$	(Paousette, 2007)
I	10^{-8} a 10^{-7}	-	$5x10^{-3}$	(Shamsai <i>et al.</i> , 2007)
I, R_2	$1.83x10^{-5}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_8	$1.20x10^{-6}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_{10}	$1.83x10^{-6}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_{12}'	$4,56x10^{-7}$	V	-	(Musso & Suazo, 2018)
I, R_3	$1,83x10^{-5}$	-	-	(Arredondo & Suazo, 2022)

A = Arenas de relave // L = Lamas // I = Integral (Relave pre-ciclado) // R_i , $i = 1, \dots, n$: Relave i analizado por el mismo autor // C = Ensayo de carga constante // V = Ensayo de carga variable // *: Mina de Cu y Mo // **: Mina de Cu y Au // ***: Mina de Cu, Ag, y Au // ': Mina de Fe // -: Sin información

De la Tabla 5 se desprende que la permeabilidad de las arenas de relaves estudiadas varía desde 0.9 a 210, para el caso de las lamas la permeabilidad varía entre 0.015 y 3.75, y por último para el caso de los relaves integrales la permeabilidad varía desde 0.001 hasta 1.83. Todos los valores descritos están en 10^{-5}cm/s .

Por lo tanto, establecer un rango acotado ya sea para el coeficiente de consolidación como para la permeabilidad para cada uno de los tipos de relaves es muy complejo producto de la gran variabilidad que existe de una mina a otra. Aunque, es claro que permeabilidades más altas se alcanzan en las arenas de relave que en las lamas producto de sus granulometrías.

En particular para los valores reportados por Musso and Suazo (2018) mostrados en la Tabla 5, indica que la conductividad hidráulica que los relaves poseen está determinada por un rango de valores amplios, sin embargo, pequeño en comparación a los suelos naturales, debido a su origen antrópico de granulometría fina y relativamente más uniforme que los

suelos de origen natural. Los suelos de origen natural poseen un rango de valores desde 10^{-2} [cm/s], para arenas permeables, hasta 10^{-9} [cm/s], para arcillas compactas, sin embargo, este rango sólo está comprendido desde 10^{-4} [cm/s], para relaves gruesos poco consolidados, hasta 10^{-8} [cm/s], para relaves finos consolidados (Musso & Suazo, 2018).

Por otro lado, en relación con el índice de compresión (C_c) de acuerdo con las investigaciones realizadas por Hu et al. (2017), ronda en torno a 0.025 y 0.085 para las lamas y para las arenas de relave, respectivamente. Además, James et al. (2011) reporta según los resultados de las pruebas, que el índice de compresión (C_c) se estima cercano a 0,08 y el índice de recompresión (C_r) es aproximadamente 0, aunque su análisis es para relaves de una mina de oro clasificados como limos arenosos (ML) según la USCS (ASTM, 2017a).

Para los relaves de cobre, tanto las arenas de relave como las lamas se caracterizan por ser suelos de una compresibilidad baja y moderada, respectivamente. Además, para el mismo tipo de relaves (independiente del mineral extraído), los relaves finos siempre presentan mayor compresibilidad que los gruesos. En cambio, para diferentes tipos de relaves, la compresibilidad no solo está relacionada con el tamaño de grano y el tipo de mina, sino que también depende del grado de la mina, tecnología minera, proceso de molienda, método de deposición, y composición mineralógica (Hu *et al.*, 2017).

3.7 Curva de retención de agua (SWRC)

Una de las principales causas que interfiere el comportamiento del suelo en distintos aspectos es si el agua está presente o no, generalmente cuando se estudia un suelo se tiende a diferenciar entre suelos secos y suelos saturados, pero existe un estado de transición en donde el suelo no se encuentra completamente seco ni completamente saturado, este estado se denomina parcialmente saturado o no saturado.

Cuando se trata de conocer el comportamiento de los suelos en un estado parcialmente saturado se deben considerar otros efectos propios de este estado, por ejemplo, la succión. La succión en los suelos es un efecto ampliamente estudiado para los suelos parcialmente saturados, en general se habla de succión total (ψ_t), la cual representa la energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua Lee & Wray (1995), y se expresa como la suma entre la componente osmótica de succión (ψ_o) y la componente matricial de succión (ψ).

La componente matricial (ψ) está asociada comúnmente al fenómeno de la capilaridad, que a su vez es producto de la tensión superficial. En cambio, la componente osmótica (ψ_o) esta asociada a la presencia de sales disueltas en la fase acuosa del suelo. Los autores Fredlund and Rahardjo (1993), presentan una serie de estudios concluyendo que en la practica la succión osmótica (ψ_o) es despreciable en comparación con la succión matricial (ψ), por lo tanto, generalmente no se considera.

Una forma de representar y visualizar el efecto de la succión del suelo es la curva de retención de agua, SWRC o SWCC por sus siglas en inglés “Soil water retention curve” o “Soil water characteristic curve”, respectivamente. La cual se puede describir como la capacidad de almacenamiento del suelo a medida que el contenido de agua cambia cuando se somete a distintos valores de succión. En otras palabras, la SWRC define la relación entre la succión

del suelo (presión de poros negativa) y el contenido gravimétrico de agua, o el contenido volumétrico de agua, o el grado de saturación del suelo (Vanapalli *et al.*, 2002).

En la Figura 13 se muestra una curva de retención de agua típica de un suelo, en la cual se identifican 3 zonas, las cuales están delimitadas por 2 puntos característicos reconocidos por diversos autores. Las principales zonas reconocidas son la zona de efecto de borde, la zona de transición y la zona residual. Estas zonas están delimitadas por dos puntos llamados valor de entrada de aire y valor de la succión residual, respectivamente.

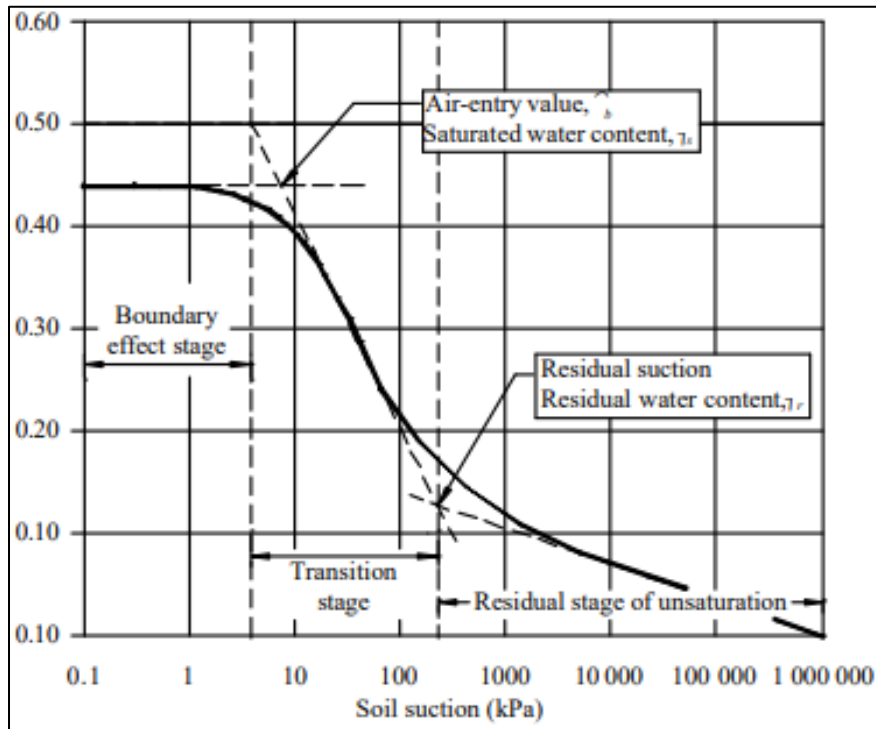


Figura 13.- Forma típica de SWRC identificando distintos estados de desaturación. Vanapalli et al. (2002)

Las zonas y puntos mencionados de la Figura 13 se pueden describir según lo siguiente:

- ❖ Zona de efecto de borde : Es el tramo de la curva que posee una menor succión y una mayor cantidad de agua, donde la curva se comporta más horizontal que el tramo siguiente y está delimitada por el punto de entrada de aire.
- ❖ Punto de entrada de aire : Denotado como (ψ_a) o AEV por sus siglas en inglés “Air-Entry Value”, es el valor de la succión requerida para que el aire ingrese a los poros más grandes del suelo y se inicie de esta manera el proceso de desaturación del suelo.
- ❖ Zona de transición : Zona en la cual existe una interfase continua entre el aire y el agua.

- ❖ Punto de succión residual : Denotado como (ψ_r), corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente de aire.
- ❖ Zona residual : Zona de la curva más seca de la SWRC.

Las zonas y puntos mencionados anteriormente pueden verse desplazados o modificados en función de diferentes factores, entre ellos, la distribución del tamaño de los poros, la distribución del tamaño de las partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo (Dineen, 1997; D. Fredlund & Rahardjo, 1993; Ning Lu & William, 2000). En particular, en la Figura 14 se muestra la variación de la forma de la SWRC en función del tamaño de las partículas y el tamaño de los poros (D. Fredlund & Rahardjo, 1993).

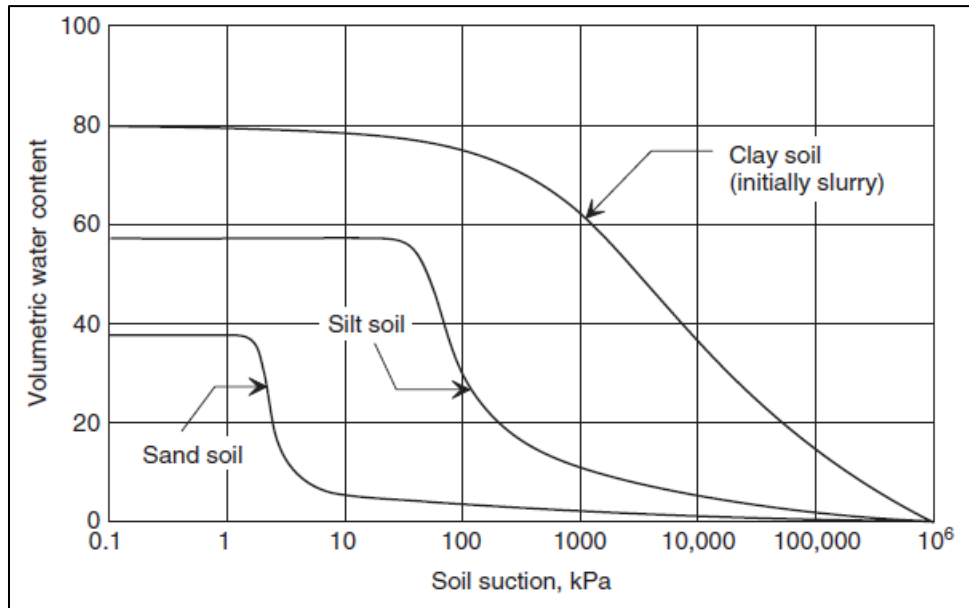


Figura 14.- Comparación de formas de la curva de retención de agua para distintos tipos suelos. Fredlund and Rahardjo (1993).

En la Figura 14 se puede observar que el valor de la entrada de aire (ψ_a) de los suelos con granulometría más gruesa es menor que para suelos más finos, debido a la presencia de los poros de mayor tamaño, donde el predominio de la capilaridad presente en la succión matricial provoca un menor requerimiento de la succión para iniciar el proceso de desaturación del suelo (Musso and Suazo, 2018).

Dada la importancia de esta curva para la ingeniería geotécnica y de la complejidad en su representación, numerosos investigadores han sugerido diversas formas para la obtención de la SWRC, ya sea de forma empírica o ajustando resultados experimentales (Aubertin et al., 2003; Brooks & Corey, 1964; Brutsaert & Ibrahim, 1966; Campbell, 1974; D. Fredlund & Xing, 1994; M. Fredlund et al., 2002; McKee & Bumb, 1984; Pereira & Fredlund, 2000; Van Genuchten, 1980; Vereecken et al., 1989).

En particular para determinar el punto de entrada de aire (ψ_a) existen varios métodos, entre los cuales destacan los desarrollados por Brooks & Corey (1964) y van Genuchten, Leij & Yates (1991), o considerar como aproximación $\psi_a = \psi_{90}$ (succión correspondiente a un contenido de humedad del 90% de la humedad de saturación). En cambio, para el punto de succión residual (ψ_r), el cual representa la succión o el contenido de agua presente en la matriz de suelo donde un aumento adicional de presión negativa o succión no produce cambios significativos en el contenido de agua, se suele determinar por regresiones, en donde la solución propuesta por Kovacs (1981) es ocupada comúnmente.

Según Kovacs (1981) se espera que el valor de ψ_a se encuentre en el rango de 0,2 a 1 [kPa] para arenas gruesas, 1 a 3,5 [kPa] para arenas medianas, 3,5 a 7 [kPa] para arenas finas, 7 a 25 [kPa] para limos y más de 25 [kPa] para arcillas. Y el valor de ψ_r se encuentre cercano al 5% para arenas limosas, cercano al 10% para limos y un 15% para arcillas (Kovacs, 1981).

Para obtener la SWRC experimentalmente se puede recurrir a un método directo como lo es la utilización de tensiómetros, o se puede determinar a través de métodos indirectos como, por ejemplo, la traslación de ejes, papel filtro, método centrifugo, higrómetro de espejo refrigerado, sensores WaterMark 200SS, o sensores sicrómetro de suelo.

En la Figura 15 se muestra la curva de retención de aguas para distintos relaves analizados por Musso & Suazo (2018) obtenida a través del método de traslación de ejes ajustadas mediante el modelo de Fredlund & Xing (1994), además se muestran las curvas obtenidas por Azmi et al. (2019), Dean et al. (2014), Riquelme & Godoy (2017), y Swanson et al. (1999).

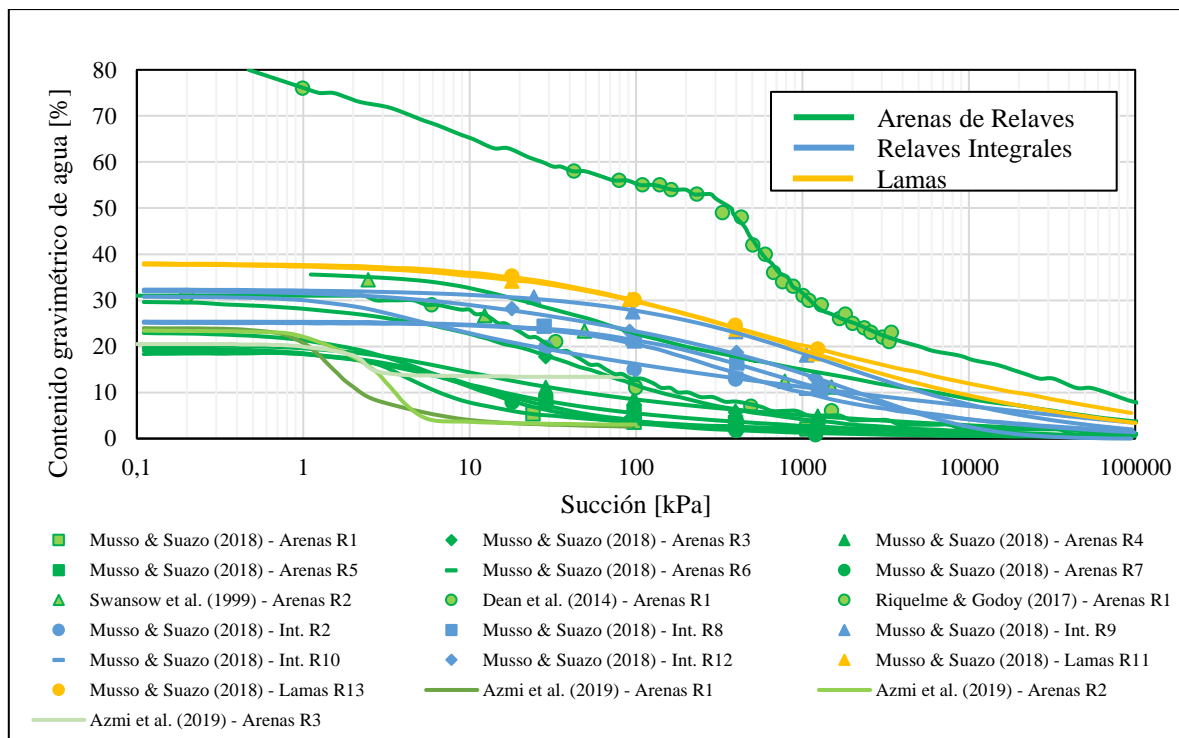


Figura 15.- SWRC de relaves diferenciados según origen. Modificado de Musso and Suazo (2018)

En la Figura 15 se observa claramente que los distintos materiales en función de su origen tienen una tendencia a tener un contenido gravimétrico de agua distinto. En particular para los relaves, el caso de las arenas de relaves representadas en color verde se observa que producto de su granulometría el tamaño de los poros es mayor en comparación con granulometrías más finas, por lo tanto, las fuerzas capilares poseen una magnitud poco relevante. Es decir, el ascenso capilar de agua por sobre el nivel freático tiene menor magnitud en comparación con las lamas, las cuales están representadas en color amarillo. Lo anterior, con la excepción de la curva de retención de aguas presentada por Dean et al. (2014), ya que en este caso en particular se obtiene un mayor contenido de aguas con respecto a las demás curvas presentadas. En cuanto a los relaves integrales representados en color azul en la Figura 15, se observa una situación intermedia, lo cual está directamente relacionado con la granulometría presentada en la Figura 8 para estos tipos de relave.

Con respecto a las presiones de succión correspondientes al punto de entrada de aire o AEV, en la Figura 15 se observa que para las lamas son mayores en comparación a las arenas de relave, lo que se traduce en que el ascenso capilar por sobre el nivel freático sea más grande en los relaves finos en comparación con los relaves de granulometría más gruesa.

Adicionalmente en la Figura 15 se visualizan resultados experimentales que respaldan lo planteado esquemáticamente en la Figura 14 con respecto al mayor contenido gravimétrico de agua y mayores succiones correspondientes al punto de entrada de aire en los relaves de granulometría más fina (lamas) en comparación con relaves de granulometría más gruesa (arenas de relaves).

Respecto a la variabilidad que se puede presentar dentro de un mismo depósito se debe considerar que el proceso de vertido de relaves al depósito constituye un aporte de agua relevante, los cuales, al momento de escurrir por la superficie de la estructura hasta la laguna de aguas claras, se someten a un proceso de segregación de sus partículas por tamaño desde el más grueso al más fino (Blight, 1979). Por lo tanto, lo anterior causa que las estructuras de relaves posean una mayor permeabilidad cerca de los bordes que en el centro o en la zona de ubicación de la laguna de decantación. Esto provoca que, al alejarse de la zona de vertido de relaves, varíe su granulometría, y con ello también variarán las propiedades capilares, que son expresadas específicamente en la curva de retención de agua (SWRC) (Musso and Suazo, 2018).

3.8 Resistencia al corte

3.8.1 Definición

El criterio de falla de Mohr-Coulomb define la envolvente de resistencia al corte de un material granular como una línea recta en el plano $\tau - \sigma$ (Coulomb, 1776; Mohr, 1900), la cual es representada por la expresión mostrada en la ecuación (4).

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

Los términos de cohesión (c') y ángulo de fricción interna (ϕ') corresponden a los parámetros que definen la envolvente de resistencia al corte del suelo en términos de tensiones efectivas. Esta última puede ser calculada de acorde con la teoría planteada por

Terzaghi (1925, 1936) sobre los esfuerzos totales, efectivos, y presión de poros como lo describe la ecuación (5).

$$\sigma = \sigma' - \Delta u \tag{5}$$

La cohesión se presenta en los suelos que poseen una matriz de suelo fino en estado parcialmente saturado, en estado preconsolidado, en suelos granulares con una fuerte trabazón mecánica, o en suelos con algún grado de cementación. Por otro lado, el ángulo de fricción interna de un suelo está controlado por la densidad del material y por el nivel de presión de confinamiento. Este último factor provoca que el criterio de falla no sea exactamente una recta.

3.8.2 Respuesta drenada y no drenada

En general la respuesta de los suelos y los relaves ante alguna sollicitación está condicionada por la condición de saturación que presenten (saturado, parcialmente saturado, seco), por la densidad que ostenten (un estado denso o suelto), y además por el tipo de sollicitación a la cual se enfrentan.

Cuando existe algún grado de saturación, se reconocen dos respuestas. La primera, una respuesta drenada en el caso que el suelo se encuentre en un “estado denso” y la carga o sollicitación sea lo suficientemente lenta tal que permita la disipación de la presión de poros. La segunda, una respuesta no drenada en el caso que el suelo se encuentre en un “estado suelto” y la sollicitación sea lo bastante rápida tal que no permita la disipación de la presión de poros.

En el caso de que la respuesta sea drenada existe una disipación de la presión de poros y por lo tanto se produce un aumento de la presión efectiva del suelo, efecto que se considera favorable debido a que aumenta la resistencia al corte del suelo. Caso contrario ocurre cuando la respuesta es no drenada, ya que, al no proporcionarse las condiciones de drenaje se genera un aumento temporal de la presión de poros induciendo una disminución en las presiones efectivas y por lo tanto un efecto negativo a la estabilidad, ya que este efecto se traduce en una reducción en la resistencia al corte del suelo.

3.8.3 Parámetros de resistencia de relaves

En la Tabla 6 presenta las propiedades resistentes de relaves provenientes de minas de cobre, en donde se enseñan rangos de valores para los parámetros de ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión (C_{cu}), indicando también el rango de esfuerzos en los cuales se calcularon los parámetros anteriores. Además, se realiza una distinción bajo que condición de drenaje fueron calculados los parámetros mencionados, es decir, si fueron calculados bajo una condición drenada (D) o no drenada (U).

Tabla 6.- Recopilación propiedades de resistencia de relaves provenientes de minas de Cobre.
Fuente: Elaboración propia.

Relave	Condición	ϕ [°]	C_{cu} [kPa]	σ [kPa]	Referencia
A	U	19-20	33-43	-	(Wahler, 1974)
A	D	33-37	-	0 a 672	(Volpe, 1979)

Relave	Condición	ϕ [°]	C_{cu} [kPa]	σ [kPa]	Referencia
A	D	38-44	-	-	(Verdugo, 1983)
A, R_1	D	34-36	0	-	(Lara, Gómez & Barrera, 1999)
A, R_2	D	34-37	0	-	(Lara, Gómez & Barrera, 1999)
A	U	34	0	25 a 100	(Qiu & Segó, 2001)
A	D	34-38	~ 0	-	(Peters, 2004)
A	U	-	0-2200	0 a 5000	(Solans, 2010)
A	D	30-35	0	<1000	(Campaña, 2011)
A	D	28-33	50 a 200	>1000	(Campaña, 2011)
A	D	39.1-41.1	-	50 a 450	(Bhanbhro, 2014)
A	U	40	32	200 a 800	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
L	U	14	63	-	(Wahler, 1974)
L	U	14-24	0-20	-	(Wahler, 1974)
L	D	34	-	0 a 816	(Mittal & Morgenstern, 1976)
L**	D	28-40.5	-	960	(Blight & Steffen, 1979)
L	D	33-37	-	0 a 672	(Volpe, 1979)
L	U	24-37	8-21	-	(Shamsai <i>et al.</i> , 2007)
L	D	39.7-40.2	-	50 a 450	(Bhanbhro, 2014)
L	U	38	0	200 a 800	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
I	U	13-18	0-96	-	(Volpe, 1975)
I**	D	30-37	-	-	(Vick, 1983)
I	D	34-35	0	-	(Lara, Gómez and Barrera, 1999)
I	D	37-42	-	40 a 300	(Paousette, 2007)
	U	40-43	-	90 a 170	(Paousette, 2007)
I	U	8-29	30-95	-	(Shamsai <i>et al.</i> , 2007)
I	U	-	12-70	100 a 300	(Cifuentes & Verdugo, 2007)
I	U	-	0-213	690	(Osorio, 2009)
I	U	34	0-1200	100 a 3000	(Verdugo & Santos, 2009)
I	U	32-36	-	-	(Conejera, 2016)
E	U	34	0-350	100 a 1000	(Verdugo & Santos, 2009)

A = Arenas de relave // L = Lamas // I = Integral (Relave pre-ciclizado) // E = Relaves espesados simulados // R_i , $i = 1, \dots, n$: Relave i analizado por el mismo autor // *: Mina de Cu, Ag, y Au // **: Mina de Au // D = Drenada // U = No drenada // -: Sin información

De la Tabla 6 se observa que el ángulo de fricción (ϕ) para las arenas de relave es cercano a $35^\circ \pm 5^\circ$, exceptuando el relave analizado por Wahler (1974), el cual tiene un ángulo de fricción menor que se puede atribuir a que posee una mayor cantidad de finos. Para el caso

de las lamas y los relaves integrales, el ángulo de fricción (ϕ) tiene una leve tendencia a ser menor, pero se ve un ligero aumento en las cohesiones registradas.

Peters (2004) analizó 32 relaves de cobre determinando que los relaves presentan un ángulo de fricción interna variable entre 34° y 38° y que la cohesión de la envolvente de la resistencia es prácticamente nula (Peters, 2004). Por otro lado, Campaña (2011) identificó que la envolvente de resistencia varía en función de la presión de confinamiento como se observa en la Tabla 6, además indica que la envolvente de resistencia para altas presiones tiende a cambiar de pendiente debido a la rotura de granos que experimentan las arenas de relaves (Campaña, 2011).

En la Figura 16 se observa la variación del ángulo de fricción interna con el contenido de finos reportada por Peters (2004), resultados que se comparan con los valores registrados por Verdugo (1983) para la misma relación. Ambas investigaciones realizadas para relaves de cobre de distintos depósitos de Chile, en particular, Peters (2004) recopiló información a partir de un archivo técnico del Servicio Nacional de Geología y Minería.

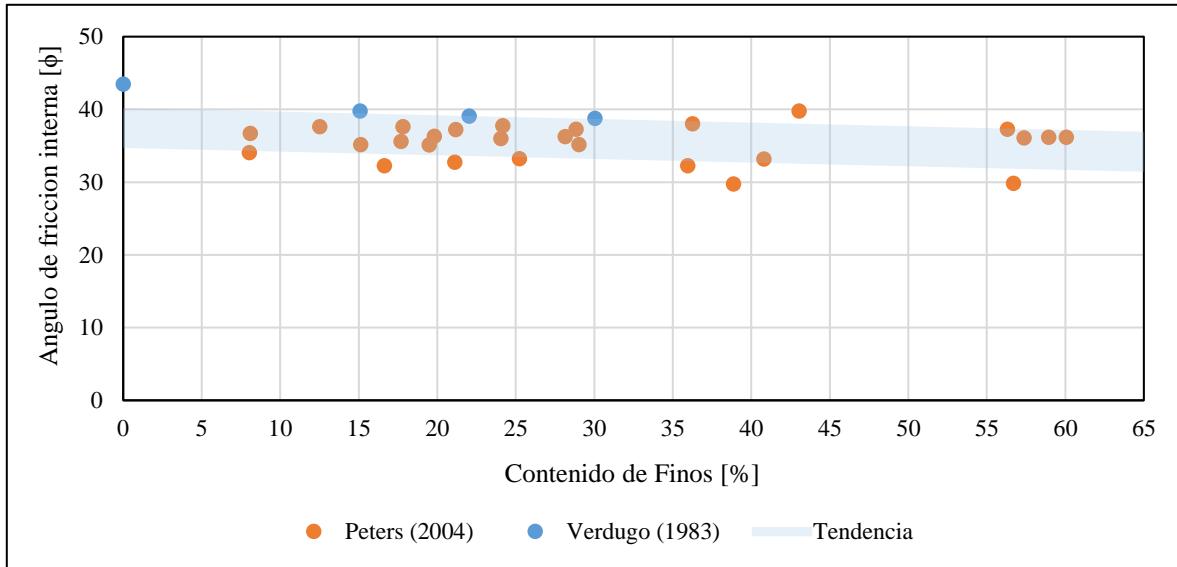


Figura 16.- Variación del ángulo de fricción interna con el contenido de finos.

En la Figura 16 se observa que una disminución de la trabazón mecánica al aumentar el contenido de finos y con ello la dilatancia (Verdugo, 1983; Peters, 2004). En el caso particular de la investigación realizada por Cifuentes & Verdugo (2007), corresponde a un relave del depósito “Ovejería” (División Andina – Codelco), con un contenido de sólidos del 72%, en donde se obtuvo una relación de $S_u = 0.237 \cdot \sigma'$ para las pruebas realizadas. En el mismo sentido, Osorio (2009) obtuvo la relación $S_u = 0.31 \cdot \sigma'$ para un relave con un contenido de finos del 52% y Solans (2010) obtuvo la relación $S_u = 2.66 + 0.36 \cdot \sigma'$ para presiones hasta los $35 [kg/cm^2]$ y $S_u = 0.439 \cdot \sigma'$ para presiones desde los 35 hasta los $50 [kg/cm^2]$, ambas relaciones para arenas de relaves provenientes desde el depósito “El Torito” (Mina El Soldado – Anglo American). Por último, Campaña (2011) establece un rango para la resistencia no drenada entre 0.11 a 0.44 para S_u/σ' .

Campaña (2011) realizó pruebas en distintas arenas de relaves provenientes de minas de cobre. Algunas arenas ensayadas provienen del depósito de relaves Las Tórtolas, depósito correspondiente a la operación de la mina Los Bronces, y otras arenas corresponden a dos minas distintas de Chile y una de Perú. En particular sobre las pruebas triaxiales no drenadas presenta la variación promedio de la resistencia no drenada con el índice de vacíos y el contenido de finos, relación que se muestra en la Figura 17.

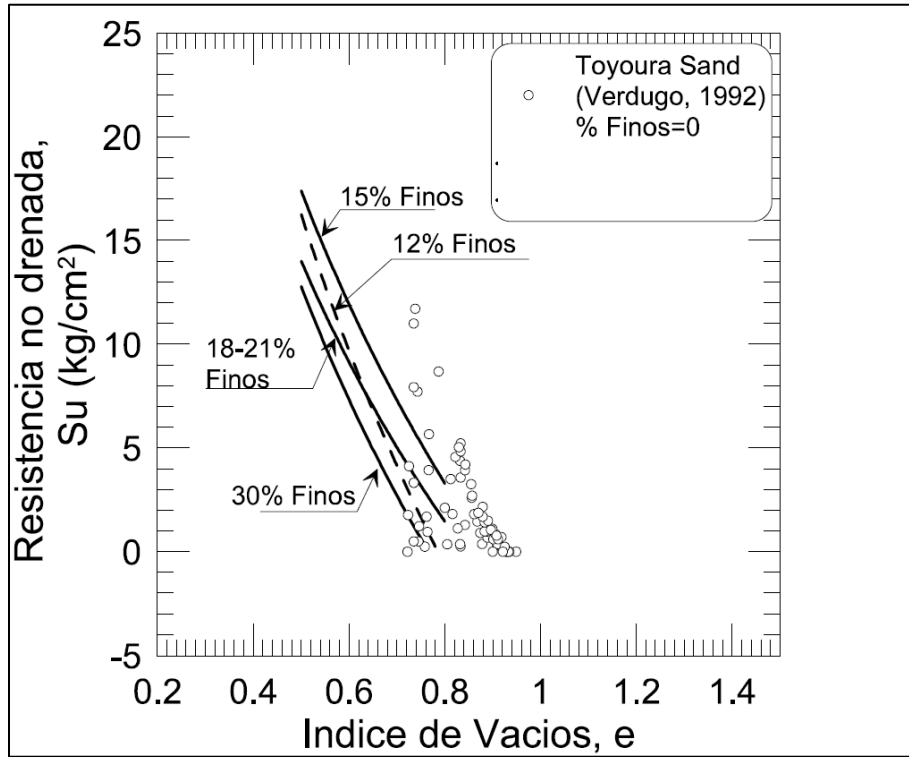


Figura 17.- Variación promedio de la resistencia no drenada con el índice de vacíos y el contenido de finos. Campaña (2011)

En la Figura 17 se observa que existe una importante disminución de la resistencia no drenada en la medida que se incrementa el contenido de finos sobre el 15%. Además, es posible que las variaciones en la resistencia no drenada sean dependientes del contenido de finos no plástico de las muestras (Campaña, 2011).

3.8.4 Estado crítico o “Critical state”

El suelo al estar compuesto por un arreglo de partículas granulares de diferentes tamaños y formas, las cuales conforman un esqueleto granular cuyos espacios son ocupados por agua y aire, resulta ser un material con un comportamiento distinto a otros tipos de materiales más clásicos de la resistencia de materiales como lo son el hormigón, el acero, o la madera.

Un comportamiento especial del suelo es su respuesta ante alguna sollicitación, en donde este presenta una tendencia a experimentar un cambio volumétrico debido a la redistribución de las fuerzas de contacto entre partículas y al cambio en la densidad de la masa de suelo durante la sollicitación.

Esta tendencia del suelo a experimentar un cambio de volumen tiene una influencia directa en la resistencia al corte, en especial si esta tendencia es impedida de desarrollarse producto de las condiciones de drenaje que presente el suelo (Campaña, 2011).

Después de las investigaciones desarrolladas principalmente por Reynolds (1885); Casagrande (1936); Roscoe, Schofield & Wroth (1958) se ha identificado que el cambio de volumen que pueden experimentar los suelos es contractivo o dilatante dependiendo de su densidad o índice de vacíos inicial, esfuerzos efectivo vertical o esfuerzo efectivo promedio, y ángulo de fricción.

En general para las arenas densas y arcillas preconsolidadas se observa un comportamiento dilatante, en cambio, para las arenas sueltas y arcillas normalmente consolidadas se observa un comportamiento contractivo.

Al observar este comportamiento, Casagrande (1936) desarrolló el concepto de densidad crítica o razón de vacíos crítica, la cual queda determinada cuando el suelo es sometido a un esfuerzo de corte y este cambia su razón de vacíos hasta alcanzar un volumen constante.

Con este concepto más trabajado se puede precisar qué es lo que se considera como un “estado denso” o un “estado suelto”. El estado denso hace referencia a un estado más denso que la densidad crítica del suelo en estudio, caso contrario resulta ser un estado suelto, el cual es un estado menos denso que la densidad crítica.

La teoría de estado crítico permite disponer de un modelo que unifica el comportamiento del suelo en el que los estados de esfuerzo y cambios de volumen se interrelacionan (Campaña, 2011). El estado crítico se caracteriza por la deformación continua de una masa de suelo sometida a un estado tensional constante, sin la ocurrencia de cambio de volumen (volumen constante) y a una velocidad constante de deformación. Esta condición de estado crítico o de deformación continua se observa a grandes deformaciones, estado bajo el cual se alcanza la resistencia última.

En el estado crítico existe una directa relación entre la densidad o índice de vacíos, la presión efectiva vertical o presión efectiva media y la resistencia al corte, esta relación se denomina plasticidad perfecta, línea de estado crítico, o por sus nombres en inglés “steady state line” (SSL) o “critical state line” (CSL).

Debido a que la línea del estado crítico depende de las tres variables mencionadas su representación gráfica es tridimensional, en la Figura 18 se esquematiza la relación comentada.

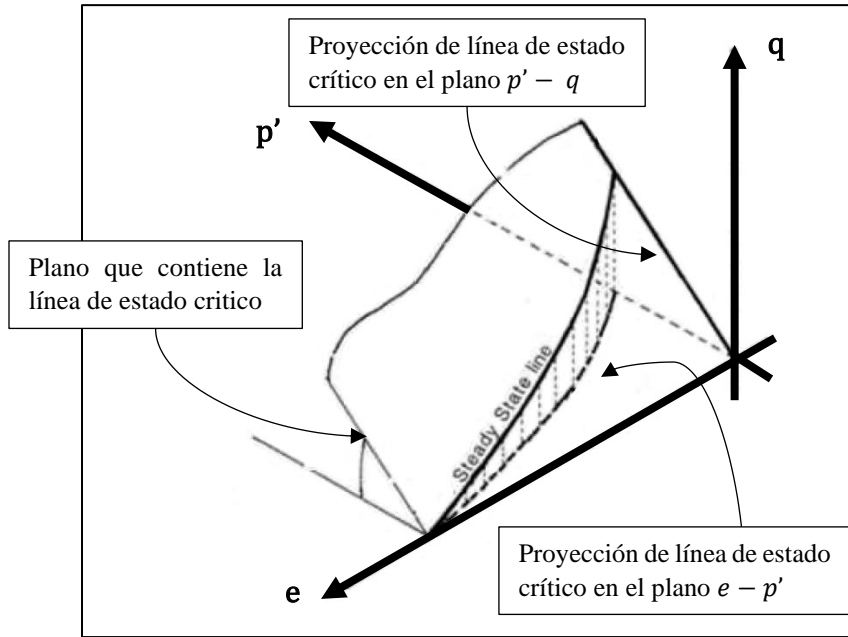


Figura 18.- Representación gráfica en los planos $e-p'-q$ de la línea de estado crítico. Modificado de Figura 13 Campaña (2011).

Dada la complejidad habitual que genera representar la línea de estado crítico de manera tridimensional, habitualmente esta es estudiada sobre las proyecciones del plano $p' - q$ y del plano $e - p'$.

3.8.4.1 Diagramas $p' - q$ y trayectoria de tensiones

Producto principalmente de la introducción de los ensayos triaxiales, los cuales permiten medir el estado de esfuerzos del suelo (σ_1 y σ_3) y la presión de poros (Δu) en cualquier momento del ensayo, se puede lograr una representación alternativa del criterio de falla de Mohr-Coulomb a través de un cambio de coordenadas. Este cambio de coordenadas permite la visualización de la trayectoria de tensiones desde el estado de consolidación hasta la aplicación del esfuerzo de corte.

Esta transformación denominada notación de Cambridge conforma el plano $p' - q$, el cual queda definido según las relaciones mostradas en las ecuaciones (6) y (7).

$$q' = \sigma_1 - \sigma_3 = q \quad (6)$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma_1 - 2 \cdot \sigma_2}{3} - \Delta u = p - \Delta u \quad (7)$$

En el plano $p' - q$ el criterio de falla de Mohr-Coulomb se expresa según la ecuación (8).

$$q = A + M \cdot p' \quad (8)$$

En donde, la cohesión (c') y ángulo de fricción interna (ϕ') se puede determinar a partir de las relaciones mostradas en las ecuaciones (9) y (10).

$$A = \frac{6 \cdot c' \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (9)$$

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (10)$$

En la Figura 19 se muestra gráficamente el plano $p' - q$ descrito por las ecuaciones anteriores, en donde se visualiza una posible trayectoria de tensiones (color azul).

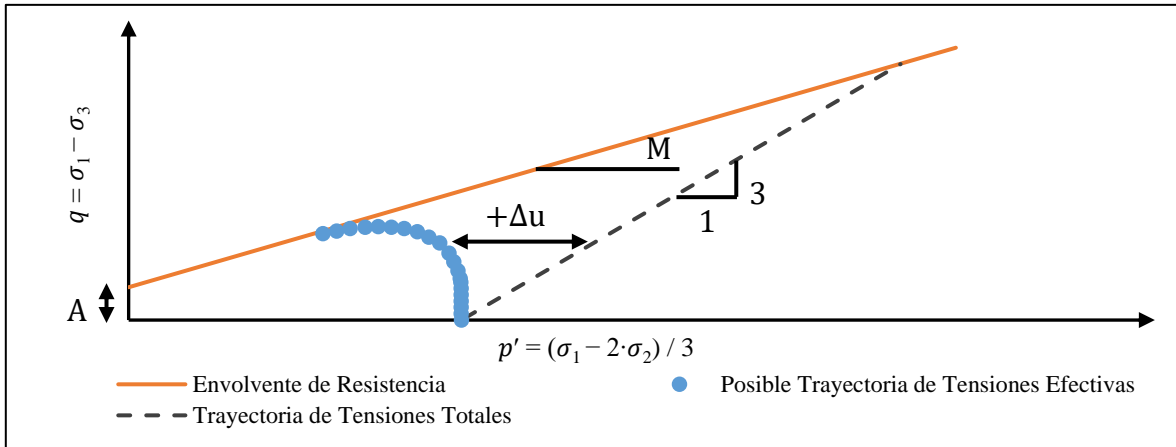


Figura 19.- Diagrama $p' - q$ con sus respectivas variables.

La trayectoria de tensiones esquematizada en la Figura 19 se obtiene en el caso que exista un aumento en la presión de poros. En caso de que la respuesta fuera drenada, la trayectoria de tensiones seguiría la misma línea que la trayectoria de tensiones totales.

En la Figura 20 se presentan los resultados de Conejera (2016), quien ejecutó ensayos triaxiales no drenados sobre áreas de relaves provenientes del tranque de relaves Ovejería, pertenecientes a la división Andina de CODELCO. En la Figura 20 se visualizan las trayectorias de tensiones para estas arenas de relaves, las cuales fueron ensayadas con presiones de cámara igual a 1, 2, 4, y 6 $[kg/cm^2]$.

En particular, la resistencia residual al corte ultima no-drenada (residual) normalizada por la tensión vertical es solo función de la densidad del material y no del nivel de presión confinante (Verdugo, 1992; Campaña, 2011). Si bien en la Figura 20 no se puede apreciar este efecto, ya que no se tiene una densidad inicial igual en todas las pruebas, resulta ser un buen ejemplo para el demostrar que la resistencia ultima depende de la densidad inicial, ya que en todas las curvas se llega a una resistencia ultima distinta.

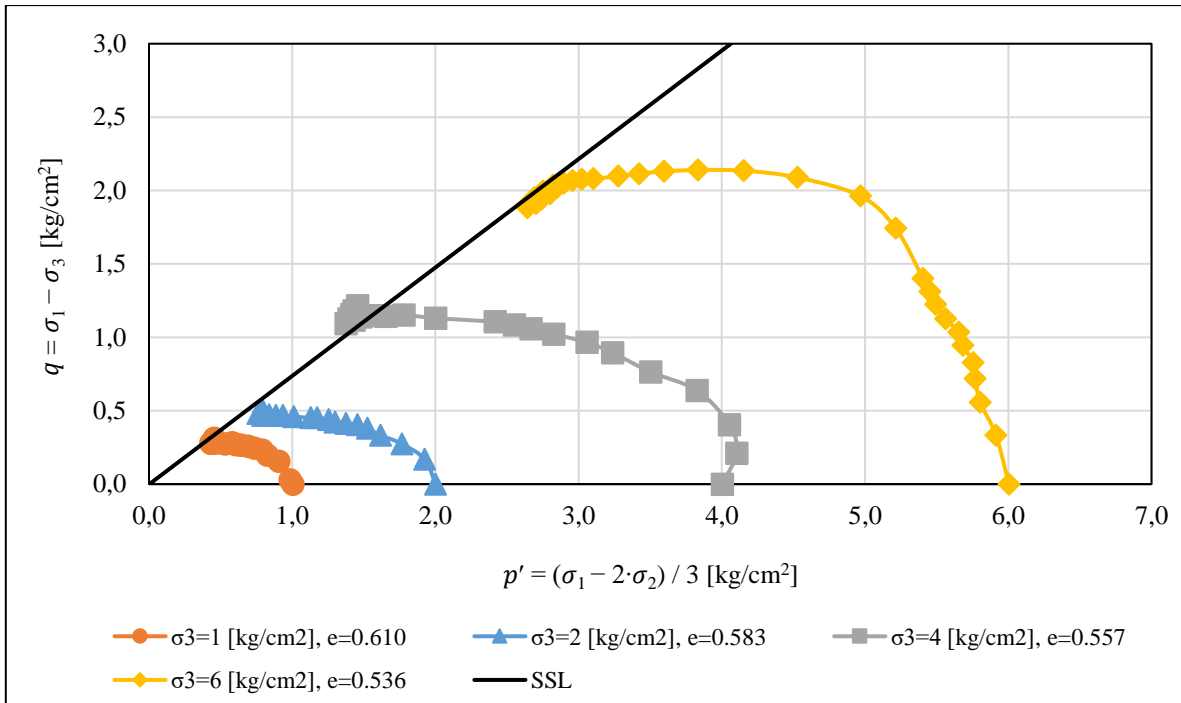


Figura 20.- Trayectoria de tensiones efectivas para ensayos triaxiales CIU en arenas de relaves Ovejera. Conejera (2016).

En la Figura 20 se observa que, para distintos niveles de confinamiento inicial, la resistencia al corte ultima no drenada define la línea de estado crítico (CSL). Por otro lado, en el caso que la respuesta sea drenada, es decir, que la aplicación de la sollicitación sea lo suficientemente lenta para permitir la disipación de la presión de poros, la resistencia al corte depende de la presión de confinamiento y la trayectoria de tensiones impuesta (Campaña, 2011).

En el plano $e - p'$ es usual representar la línea de estado crítico (CSL) en los planos $e - \log(p')$ o $e - \ln(p')$, sin embargo, para bajas y altas presiones la línea de estado crítico tiende a curvarse, es decir, deja de ser una recta. El efecto de esta curva para grandes presiones se debe principalmente a la rotura de partículas (Campaña *et al.*, 2015).

En la Figura 21 se muestra el cambio que tuvieron las muestras respecto a su densidad, los símbolos sin relleno corresponden al estado inicial de densidad de las curvas mostradas en la Figura 20, por otro lado, los símbolos con rellenos muestran las densidades finales.

Las curvas de consolidación isotrópica y de estado crítico (CSL) se pueden observar definidas en la Figura 21 en función de las densidades iniciales y últimas, respectivamente. Además, se puede observar claramente el comportamiento no drenado en las 4 pruebas, ya que el desplazamiento de los puntos es horizontal, es decir, el estado inicial era menos denso que el estado crítico.

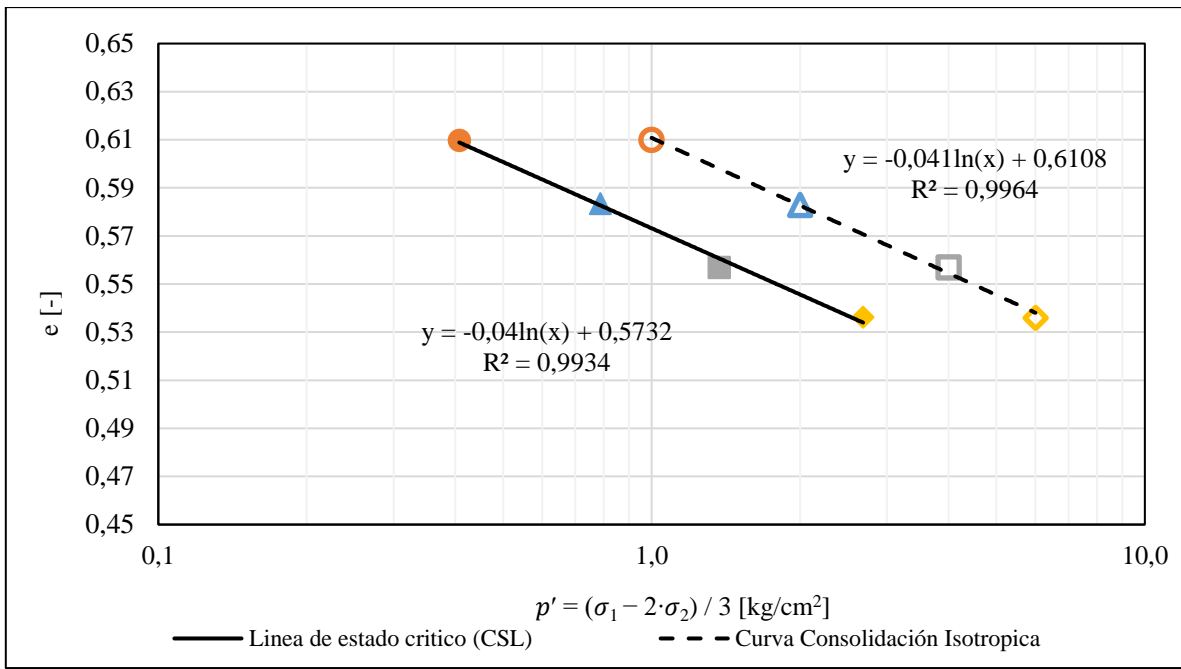


Figura 21.- Comparación curvas de consolidación isotrópica y líneas de estado último. Conejera (2016)

Capítulo IV - Conclusiones

De los relaves analizados se aprecia claramente que tanto los relaves integrales, las arenas de relave, y las lamas presentan una banda granulométrica relativamente bien definida respectivamente. Este efecto se atribuye directamente al proceso de cicloneo realizado en las faenas mineras.

Adicionalmente, la granulometría de los relaves se ve influenciada dependiendo del proceso en el cual está inmerso el suelo para la extracción del mineral que se busca obtener. Algunos procesos que pueden afectar esta variabilidad son el tipo de molienda aplicada o la búsqueda de otros minerales, que requieren un reprocesado del material.

Otro factor que puede condicionar la granulometría es el hecho que puede existir una disminución del tamaño de grano en función del aumento de profundidad en donde se analice el suelo, este efecto puede ser debido al método de construcción, punto de descarga diferente, tipo de producción, degradación o rotura de partículas debido a cargas elevadas o efectos de fluencia.

Producto que las arenas de relave son utilizadas para la construcción de los prismas resistentes de los tranques de relave, en general se desea obtener materiales que cumplan estándares de resistencia. Estos requerimientos en general pueden ser cumplidos con suelos que presenten curvas granulométricas como las mostradas para el caso de las arenas de relave. Por lo tanto, se puede decir que el efecto de tener una banda granulométrica estrecha es producto de que las arenas de relave deben tener una distribución granulométrica tal que sirva para la construcción de un prisma resistente.

Con respecto a la diferencia en la amplitud de las bandas granulométricas de las arenas de relaves y las lamas, una de las causas de que las lamas tengan una banda granulométrica más amplia se puede atribuir al proceso de cicloneo, ya que al ser un proceso arbitrario que depende de las necesidades y capacidad de transporte de pulpa de cada minera, resulta no ser un proceso idéntico entre relaves, es decir, en cada mina se establece un tamaño de grano objetivo que no necesariamente es el mismo para ejecutar la segregación entre arenas de relaves y lamas.

La variabilidad exhibida de los relaves integrales se puede atribuir al proceso de chancado y molienda por el cual es sometido el suelo de forma diferente en cada minera. Por ejemplo, la cantidad de veces que es chancado el suelo o el tamaño máximo de grano definido en el chancado dependiendo de las propiedades mecánicas y mineralógicas del suelo, puede ser diferente de una mina a otra. Lo anterior, provoca que el relave resultante del proceso minero tenga un tamaño de partícula diferente dependiendo del caso analizado y por ende se refleje en una banda granulométrica más amplia como las analizadas.

Considerando los relaves analizados en la presente investigación, en la Figura 22 se proponen tres curvas granulométricas según el tipo de relave. Además, se muestra de manera sombreada las bandas granulométricas que pueden presentar estos relaves.

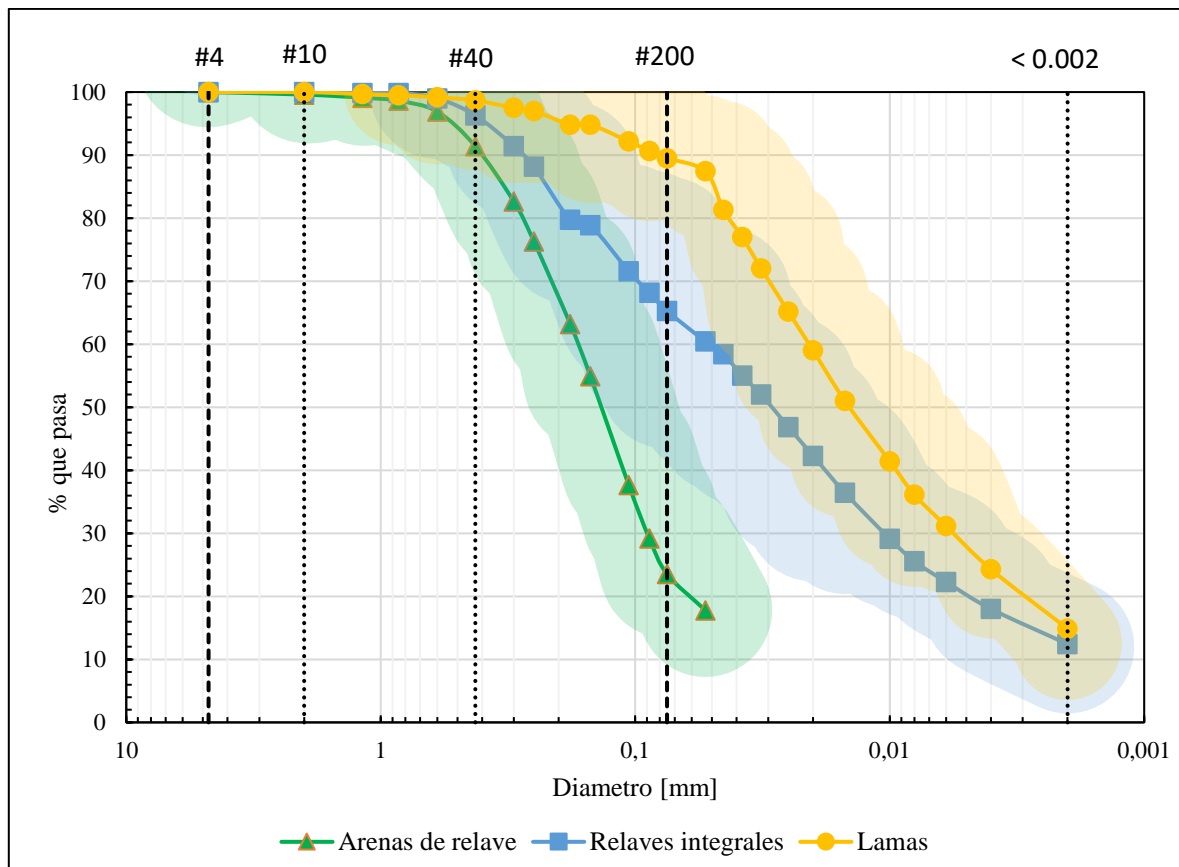


Figura 22.- Granulometrías y bandas propuestas según tipo de relave.

Las curvas granulométricas de Figura 22 fueron calculadas con la media aritmética de los datos presentados en la Figura 8, en donde se excluyeron los datos extremos para cada tipo de relave.

Entre los distintos relaves analizados no se observa una tendencia clara de la gravedad específica en función del tipo de relave. Aunque gravedades específicas más altas, por ejemplo, valores de 3,88 y 4,4 observados en algunos casos de lamas, generalmente son el resultado de la presencia de pirita en el mineral que se rechaza durante flotación y descarga con los relaves. Resultados altos, también se explican debido al alto contenido de mineral de hierro. Las leyes de hierro son bastante más altas que las del cobre por lo que durante la

recuperación de cobre las leyes remanentes en relaves son considerables en relación con aquellos remanentes para recuperación de cobre. Por otro lado, en general si los relaves estudiados se comparan con suelos naturales de similar granulometría se observa que las gravedades específicas en general son ligeramente superiores.

Por otro lado, cuando se comparan los valores registrados de gravedad específica para los relaves provenientes de minas que extraen además de cobre un mineral diferente (Molibdeno (*Mo*), Plata (*Ag*), Oro (*Au*), o Zinc (*Zn*)), se concluye que existe un ligero incremento en los valores de la gravedad específica. Por lo tanto, es posible que la mineralogía de los depósitos interfiere en la gravedad específica.

Los pesos específicos tienen una mayor sensibilidad de un depósito a otro, es decir, presentan un rango más amplio de valores. La variabilidad observada se puede atribuir principalmente a que son estudios en distintos depósitos. Aunque, existen factores que se deben considerar para el estudio en un mismo depósito, por ejemplo, es probable que las capas a mayores profundidades tengan altas densidades secas y menores relaciones de vacíos. Las altas densidades a mayores profundidades se deben generalmente a la compresibilidad de los relaves. Algunos factores principales de los que dependen las densidades secas in situ son la gravedad específica, el tipo de relaves (Arenas o Lamas) y la gradación.

Con respecto a los valores mostrados para la permeabilidad, se observa una gran variabilidad en los resultados. Aunque, es claro que permeabilidades más altas se alcanzan en las arenas de relave en comparación con las permeabilidades observadas en las lamas, este efecto se atribuye a sus respectivas bandas granulométricas. La distribución granulométrica junto con la compactación y consolidación son los parámetros que controlan la permeabilidad. El coeficiente de compresibilidad del volumen (m_v) no está relacionado en gran medida con los esfuerzos, por lo tanto, se puede mantener constante para el cálculo del coeficiente de permeabilidad (k). En cambio, el coeficiente de consolidación (C_v) si está relacionado decrecientemente con los esfuerzos, lo que implica un cambio en la conductividad (k).

Uno de los factores que afectan la alta variabilidad observada en el coeficiente de permeabilidad es que presenta variaciones considerables en las direcciones vertical y horizontal debido a las construcciones en capas de los depósitos de relaves. La relación de permeabilidad horizontal a vertical está en el rango de 2 a 10 para un depósito uniforme de arena de playa para zonas de limo depositadas bajo el agua según lo reportado por Vick (1990) y Bhanbhro (2014).

Se evidencia que el origen de los relaves condiciona la curva de retención de aguas SWRC en dos aspectos. Estos aspectos son que a medida que la granulometría de los relaves es más fina el contenido gravimétrico de agua aumenta y además se observa una succión mayor. Ambos aspectos provocan que en la práctica la capilaridad para las lamas sea mayor a la presente en las arenas de relaves.

Respecto al ángulo de fricción (ϕ) se puede concluir que si se comparan los suelos naturales con los relaves mineros es frecuente que producto de los procesos de chancado se produzca una concentración de esfuerzos en los bordes de los granos de los relaves, los cuales producto

de su angularidad probablemente puede causar aplastamiento y un aumento en la resistencia al corte.

En general se observa que el ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (C_{cu}) de las arenas de relave son mayores que las de las lamas. Mismo efecto que concluye Hu et al. (2017), tanto para los relaves de hierro como de cobre. En particular, Qiu and Sego (2001) determina que los relaves de cobre que analizó se comportaron como suelos sin cohesión.

Las lamas en términos del ángulo de fricción (ϕ) se ven menos afectadas por la sobre consolidación. La relación de vacíos (e) tiene un efecto pequeño sobre la resistencia a la tensión efectiva de los relaves.

Con respecto a la resistencia al corte no drenada, es posible observar una disminución de esta a medida que se incrementa el contenido de finos. Adicionalmente, los valores mostrados tienden a ser mayores en comparación con arenas de origen natural, pero son similares a las relaves provenientes del mismo origen (Arena de relaves).

Por último, las arenas de relaves de cobre pueden presentar características de debilitamiento por deformación leve y se comportan como suelos arenosos densos, los cuales pueden perder totalmente sus tensiones efectivas debido al aumento de la presión de sus poros. En otras palabras, los relaves arenosos tienen el potencial de fallas de licuefacción tanto estática como cíclica según lo reportado por Qiu and Sego (2001).

Bibliografía

- Aduvire, O. (2006) “Drenaje ácido de mina generación y tratamiento.” *Madrid*. [Preprint].
- Aleman, E. and Suazo, G. (2019) “Estudio experimental para el diseño de cubiertas alternativas en relaves mineros, almacenamiento-liberación y quiebre capilar.” *Universidad Técnica Federico Santa María*. [Preprint].
- Arredondo, E. and Suazo, G. (2021) “Mecanismos de agrietamiento en depósitos de relaves espesados,” *Universidad Técnica Federico Santa María. Manuscrito no publicado*. [Preprint].
- ASTM (2007) “ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016).” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D0422-63R07E02.
- ASTM (2011) “ASTM D2435, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.”
- ASTM (2014) “ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D0854-14.
- ASTM (2015) “ASTM D2850, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.” West Conshohocken, PA. Available at: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2850>.
- ASTM (2016a) “ASTM D3441, Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils.” West Conshohocken, PA. Available at: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D3441>.
- ASTM (2016b) “ASTM D4253, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D4253-16E01.
- ASTM (2016c) “ASTM D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D4254-16.
- ASTM (2017a) “ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D2487-17E01.
- ASTM (2017b) “ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D4318-17E01.
- ASTM (2018) “ASTM D2573, Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils.” West Conshohocken, PA. Available at: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2573D2573M>.

-
- ASTM (2019) “ASTM D2434, Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D2434-19.
- ASTM (2021) “ASTM D 698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).” West Conshohocken, PA. doi:10.1520/D0698-12R21.
- Aubertin, M. *et al.* (2003) “A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties,” *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), pp. 1104–1122. doi:10.1139/t03-054.
- Azam, S. and Li, Q. (2010) “Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years,” in.
- Bhanbhro, R. (2014) *Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden, Unpublished*. doi:10.13140/2.1.1338.2082.
- Bjelkevik, A. and Knutsson, S. (2005) “Swedish tailings: comparison of mechanical properties between tailings and natural geological materials,” in *Securing the future: international conference on mining and the environment, metals and energy recovery: proceedings*. SveMin, pp. 117–129.
- Blight, G. and Steffen, O. (1979) “Geotechnics of gold mining waste disposal,” *Current geotechnical practice in mine waste disposal*, pp. 1-53.
- Blight, G.E. (1979) “Properties of Pumped Tailings Fill.,” *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 79(15), pp. 446–453.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964) “Hydraulic properties of properties of porous media,” *Colorado State University, Fort Collins, CO*. [Preprint].
- Brutsaert, W. and Ibrahim, H.A. (1966) “On the first and second linearization of the Boussinesq equation,” *Geophysical Journal International*, 11(5), pp. 549–554. doi:10.1111/j.1365-246X.1966.tb03166.x.
- Campaña, J.E. (2011) “Comportamiento de arenas de relave a altas presiones,” *Universidad de Chile.*, p. 239. Available at: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102743>.
- Campaña, J.E. *et al.* (2015) “The Quillayes sand tailings dam in Chile design and operation,” *Tailings and Mine Waste 2015* [Preprint].
- Campbell, G.S. (1974) “A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data,” *Soil Science*, 117(6), pp. 311–314. doi:10.1097/00010694-197406000-00001.
- Carvajal A., M. and Pastén P, C. (2018a) “Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves.,” *Universidad de Chile*. [Preprint].
- Carvajal A., M. and Pastén P, C. (2018b) “Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves.,” *Universidad de Chile*. [Preprint].

- Casagrande, A. (1936) “Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills.,” *Boston Society of Civil Engineers*, pp. 257–276.
- Cifuentes, L. and Verdugo, R. (2007) “Resistencia Estática y Cíclica de relaves Espesados,” *IV Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaíso, Chile* [Preprint].
- Conejera, C. (2016) “Efecto de la Fábrica y la Estructura en la Resistencia No Drenada de Relave Integral.” Available at: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139887>.
- Coulomb, C.A. (1776) *Essai sur une application des regles de maximis & minimis á quelques problemes de statique, relatifs á l’architecture*. Paris: De l’Imprimerie Royale.
- Davies, M.P. (2002) “Tailings impoundment failures are geotechnical engineers listening?,” *Geotechnical News*, 20(3), p. 31.
- Dineen, K. (1997) *The influence of soil suction on compressibility and swelling*.
- Dirección de Vialidad, M. de O.P. (2019) “Manual de Carreteras,” 8.
- Espinace, R. (2015) “Depósitos de relaves: consideraciones en su manejo,” *Seminario “Tranques de relaves, una mirada detallada para el análisis informado en zonas mineras,”* p. 34. Available at: <http://www.corproa.cl/wp-content/uploads/2015/05/Relaves-Copiapo-REA.pdf>.
- Falcón, M.F. and Urbano, S. (2016) “Situación actual de los Depósitos de Relaves en Chile y Exigencias Legales en Pro de la Seguridad de los Depósitos.,” *SERNAGEOMIN, Santiago*. [Preprint].
- Fredlund, D. and Rahardjo, H. (1993) “Soil Mechanics for Unsaturated Soils,” xxiv. doi:10.1002/9780470172759.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) “Equations for the soil-water characteristic curve,” *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), pp. 521–532. doi:10.1139/t94-061.
- Fredlund, M.D., Wilson, G.W. and Fredlund, D.G. (2002) “Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve,” *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), pp. 1103–1117. doi:10.1139/t02-049.
- Galaz, J. (2011) “Estado del Arte en la Disposición de Relaves Espesados,” in *VI Seminario de Mediana Minería “Oportunidades para seguir creciendo.”* Santiago, p. 35.
- Galaz Palma, J. (2011) “Estabilidad física y química de las instalaciones mineras.,” *M&M Ltda.* [Preprint].
- van Genuchten, M., Leij, F. and Yates, S.R. (1991) “The RECT code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.”
- van Genuchten, M.Th. (1980) “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils,” *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892–898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

-
- Geremew, A.M. and Yanful, E.K. (2012) “Laboratory Investigation of the Resistance of Tailings and Natural Sediments to Cyclic Loading,” *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), pp. 431–447. doi:10.1007/s10706-011-9478-x.
- Hu, L. *et al.* (2017) “Geotechnical Properties of Mine Tailings,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), p. 04016220. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001736.
- Icold (2016) “Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences.,” *Lessons learnt from practical experiences. Paris*. [Preprint].
- INN (1979a) “NCh 1517/1, Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido.,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (1979b) “NCh 1517/2, Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico.,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (1979c) “NCh 1517/3, Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 3: Determinación del límite de contracción.,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (1980a) “NCh 1532, Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas.,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (1980b) “NCh 1726, Mecánica de suelos - Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (2008a) “NCh 1534/1, Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad - Parte 1: Métodos de compactación con pisón de 2,5 kg y 305 mm de caída,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (2008b) “NCh 1534/2, Mecánica de suelos - Relaciones humedad/densidad - Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 457 mm de caída,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (2009) “NCh 433, Diseño sísmico de edificios,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (2010) “NCh 3236, Mecánica de suelos - Tamizado y determinación de la granulometría,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- INN (2014) “NCh 1508, Geotecnia - Estudio de Mecánica de Suelos y Fundaciones,” *Instituto Nacional de Normalización* [Preprint].
- James, M. *et al.* (2011) “A laboratory investigation of the dynamic properties of tailings,” *Canadian Geotechnical Journal*, 48(11), pp. 1587–1600. doi:10.1139/t11-060.
- Klohn, E.J. (1997) “Tailings dams in Canada,” *Geotechnical News*, pp. 117–123.
- Kovacs, G. (1981) *Seepage Hydraulics*. Amsterdam; Oxford, New York.: Elsevier Scientific Publishing Company.

- Lara, J.L., Gómez, P. and Barrera, S. (1999) “Análisis dinámico tridimensional de la presa de arena de relaves Quillayes Pelambres-Chile,” *XI Conferencia Panamericana sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, FOZ do Iguazu*. [Preprint].
- Lee, H.C. and Wray, W.K. (1995) “TECHNIQUES TO EVALUATE SOIL SUCTION - A VITAL UNSATURATED SOIL WATER VARIABLE,” in.
- Lottermoser, B. (2010) “Mine Wastes, Characterization, Treatment and Environmental Impacts (Tercera edición ed.),” *Springer* [Preprint].
- McKee, C.R. and Bumb, A.C. (1984) “The Importance of Unsaturated Flow Parameters in Designing a Monitoring System for Hazardous Wastes and Environmental Emergencies,” in *Hazardous Materials and Control Research Institute of Nature Conference*. Houston, Tex, pp. 50–58.
- Medvinsky-Roa, G. ;Caroca, V; Vallejos, J. (2015) “Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo Económico Social de la Naciones Unidas. Fundación,” *Relave.Org.*, pp. 1–23. Available at: https://tbinternet.ohchr.org/Treaties/CESCR/SharedDocuments/CHL/INT_CESCR_CSS_CHL_20605_S.pdf.
- Ministerio de Justicia (1981) “DFL N° 1122: ‘Codigo de Aguas,’” *Diario Oficial*, pp. 1–95.
- Ministerio del Obras Publicas, M. (2015) “Decreto Supremo N° 50,” *Diario Oficial*, pp. 1–39.
- MINVU (2011a) “D.S. 60 - Reglamento Diseño HA.”
- MINVU (2011b) “D.S. 61 - Diseño Sísmico de Edificios,” *Diario Oficial* [Preprint].
- Mittal, H.K. and Morgenstern, N. (1976) “Seepage control in tailings dams,” *Canadian Geotechnical Journal*, 13, pp. 277–293.
- Mlynarek, Z., Lunne, T. and Schuschke, W. (1995) “Use of CPT in mine tailings,” in *International Symposium on Cone Penetration Testing*. Linkoping, Sweden, pp. 211–226.
- Mohr, O. (1900) “Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?,” *Vereins Deutscher Ingenieure*, 24, pp. 1524–1530, 1527–1577,.
- Musso, J. and Suazo, G. (2018) “Determinación de la curva de retención de agua para minerales multimetálicos de la industria chilena.,” *Universidad Técnica Federico Santa María.*, p. 94.
- Ning Lu and William J. Likos (no date) *Unsaturated Soil Mechanics*. Universidad de Michigan.
- Osorio, B. (2009) “Resistencia esática y ciclica de relaves integrales.,” *Memoria para optar al titulo de Ingeniero Civil. Universidad de Chile*. [Preprint].
- Paousette, K. (2007) “Laboratorieförsök på anrikningssand från Aitik. Ödometerförsök, skjuvförsök.”

- Pereira, J.H.F. and Fredlund, D.G. (2000) “Volume Change Behavior of Collapsible Compacted Gneiss Soil,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), pp. 907–916. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:10(907).
- Peters, G. (2004) “Propiedades geotécnicas de arenas de relave y sus implicancias en el diseño de depósitos,” *V Congreso de Ingeniería Geotécnica* [Preprint].
- Qiu, Y. (Jason) and Segoo, D.C. (2001) “Laboratory properties of mine tailings,” *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1), pp. 183–190. doi:10.1139/t00-082.
- Ramírez, N. (2007) “Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves,” *Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera*, pp. 1–42.
- Reynolds, O. (1885) “LVII. *On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations*,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(127), pp. 469–481. doi:10.1080/14786448508627791.
- Rico, M. *et al.* (2008) “Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context,” *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), pp. 846–852. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.050.
- Rodríguez, R. and Oldecop, L. (2006) “Liquefacción de los relaves mineros: Riesgo ambiental,” *Liquefacción de los relaves mineros: Riesgo ambiental. V simposio nacional de seguridad minera y desarrollo sostenible. Lima, Perú.* [Preprint].
- Rodríguez, R. and Oldecop, L. (2011) “Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves,” *Aspectos relacionados a la hidrogeología e hidroquímica en zonas mineras del sur del Ecuador. Quito* [Preprint].
- Roscoe, K., Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1958) “On the yielding of soils,” *Geotechnique* 8, 1, pp. 22–53.
- Sánchez, K. and Suazo, G. (2021) “Contenido de humedad y características mineralógicas de relaves a partir de imágenes hiperespectrales,” *Universidad Técnica Federico Santa María. Manuscrito no publicado.* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2004) “Decreto Supremo N° 72: ‘Reglamento de seguridad minera’ - Mod.DS132,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2007a) “Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves,” *Ministerio de Minería*, pp. 159–182. Available at: http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf.
- SERNAGEOMIN (2007b) “Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2015a) “Catastro de medidas y tecnologías para la prevención, control y tratamiento del drenaje minero,” *Ministerio de Minería* [Preprint].

- SERNAGEOMIN (2015b) “Guía metodologica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2016) “Guía para el cumplimiento de DS248 Depósitos de relaves bajo producción de 5000 tpm,” *Ministerio de Minería*, p. 53.
- SERNAGEOMIN (2018) “Guía metodologica para la evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes.,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2019) “Anuario de la minería en Chile,” *Ministerio de Minería* [Preprint]. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- SERNAGEOMIN (2020a) “Catastro de Depósitos de Relaves en Chile.,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2020b) “Catastro de Depósitos de Relaves en Chile.,” *Ministerio de Minería* [Preprint].
- SERNAGEOMIN (2020c) “Preguntas frecuentes sobre relaves,” *Ministerio de Minería*, pp. 1–9.
- Shamsai, A. *et al.* (2007) “Geotechnical characteristics of copper mine tailings: A case study,” *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(5), pp. 591–602. doi:10.1007/s10706-007-9132-9.
- Solans, D. (2010) “Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves.,” *Tesis Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Geotécnica, Universidad de Chile*. [Preprint].
- Terzaghi, K. (1925) *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. Leipzig u. Wien: F. Deuticke.
- Terzaghi, K. (1936) “Relation Between Soil Mechanics and Foundation Engineering: Presidential Address,” in *First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Boston, p. Vol.3,13-18.
- Troncoso, J., Verdugo, R. and Valenzuela, L. (2017) “Seismic performance of tailings sand dams in Chile,” *16th World Conference on Earthquake, 16 WCEE 2017* [Preprint].
- Ulrich, B. and Kerr, T. (2011) “Elko roundtable 2011: High-density tailings, paste and filtered tailings,” *Mining Engineering*, 63(11), pp. 66–70.
- Ulrich, B.F. and Coffin, J.G. (2017) “Characterization of Unsaturated Tailings & its Effects on Liquefaction,” *Tailings and Mine Waste 2017* [Preprint], (2013).
- Vanapalli, S. *et al.* (2002) “Suction and storage characteristics of unsaturated soils,” in.
- Verdugo, R. (1983) “Influencia del porcentaje de finos en la resistencia cíclica de arenas de relave,” *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Estructural*. [Preprint].

-
- Verdugo, R. (1992) “Characterization of sandy soil behavior under large deformation,” *Thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Engineering. University of Tokyo. Department of Civil Engineering*. [Preprint].
- Verdugo, R. (2009) “Seismic performance based-design of large earth and tailing dams,” *Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 41–60. doi:10.1201/noe0415556149.ch3.
- Verdugo, R. and Santos, E. (2009) “Liquefaction resistance of thickened tailings of copper mines,” *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 1(Robinsky 2000), pp. 295–298. doi:10.3233/978-1-60750-031-5-295.
- Vereecken, H. *et al.* (1989) “Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content,” *Soil Science*, 148(6), pp. 389–403. doi:10.1097/00010694-198912000-00001.
- Vick, S.G. (1983) “Planning, design, and analysis of tailings dams,” in.
- Vick, S.G. (1990) *Planning design and analysis of tailings dams*.
- Villavicencio, A.G. *et al.* (2011) “Estimation of the Variability of Tailings Dams Properties in Order to Perform Probabilistic Assessment,” *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(6), pp. 1073–1084. doi:10.1007/s10706-011-9438-5.
- Villavicencio, G. *et al.* (2014a) “Failures of sand tailings dams in a highly seismic country,” *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), pp. 449–464. doi:10.1139/cgj-2013-0142.
- Villavicencio, G. *et al.* (2014b) “Failures of sand tailings dams in a highly seismic country,” *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), pp. 449–464. doi:10.1139/cgj-2013-0142.
- Villavicencio, G. *et al.* (2014c) “Failures of sand tailings dams in a highly seismic country,” *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), pp. 449–464. doi:10.1139/cgj-2013-0142.
- Volpe, R. (1975) “Geotechnical Engineering Aspects of Copper Tailings Dams,” *ASCE*, ASCE, Prep, pp. 1-30.
- Volpe, R. (1979) “Physical and Engineering Properties of Copper Tailings,” *Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal*, ASCE, pp. 242-260.
- Wahler, W. (1974) “Evaluation of mill tailings disposal practices and potential dam stability problems in Southwestern United States.”
- Wijewickreme, D., Sanin, M. v. and Greenaway, G.R. (2005a) “Cyclic shear response of fine-grained mine tailings,” *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1408–1421. doi:10.1139/t05-058.
- Wijewickreme, D., Sanin, M. v. and Greenaway, G.R. (2005b) “Cyclic shear response of fine-grained mine tailings,” *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1408–1421. doi:10.1139/t05-058.
-

Witt, K.J. *et al.* (2004) “Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities,” *Romania, A European*(February 2004).

Zuñiga, R. and Suazo, G. (2019) “Evaluación de la estabilidad física de depósitos de relave mediante la utilización de penetrómetros ligeros,” *Universidad Técnica Federico Santa María*. [Preprint].