

## Rol del Ingeniero Geotécnico en la Construcción de Depósitos de Relaves ejecutados sobre suelos cementados por Sales.

**Matías Valenzuela, Alejandro Castañón & Gonzalo Jara**

*Stantec Consultoría Chile Ltda, Santiago, Chile, Matias.valenzuela@stantec.com & Alejandro.castanon@stantec.com.*

**RESUMEN:** Los suelos cementados por sales, también conocidos como suelos salinos, se caracterizan por presentar alta resistencia al corte, elevada rigidez y gran capacidad de soporte, debido a la cementación que entregan las sales en la unión de las partículas del material sólido, cuando estos se encuentran en estado seco. Sin embargo, cambios en su contenido de humedad o un aumento de saturación modifican las propiedades descritas anteriormente, generando problemas de inestabilidad, asentamientos y/o colapsos, causando daños a las estructuras construidas sobre estos materiales, producto de la pérdida de capacidad de soporte. Suelos con estas características predominan en el norte de Chile, donde se cuenta con un clima árido, con altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación.

En un proyecto de ingeniería relacionado a la construcción de presas de relaves, en presencia de suelos salinos, durante la etapa de diseño se definen parámetros y criterios de aceptabilidad para su uso como material de fundación y, se adoptan consideraciones geotécnicas para su uso como material de empréstito, en general obtenidas a partir de la ejecución de campañas de investigación de terreno, ensayos de laboratorio, antecedentes técnicos y experiencias propias del diseñador en este tipo de suelos, con el objetivo de resguardar la integridad de la obra.

A partir de lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo entregar recomendaciones que pueden ser implementadas durante la etapa de construcción de presas de relaves, orientadas al rol y necesidad de contar con un ingeniero geotécnico en terreno, que haya participado en los diseños de ingeniería y cuyo propósito sea verificar el cumplimiento de la intención de diseño y la implementación de las consideraciones y criterios de aceptabilidad establecidos en las especificaciones técnicas del proyecto.

**PALABRAS CLAVES:** Suelos salinos, colapso, depósitos de relaves, Ingeniero Geotécnico.

---

## Rol of geotechnical engineer on tailing dams construction executed on salt-cemented soils

**ABSTRAC:** Salt-cemented soils also known as saline soil, are characterized by high shear strength, high rigidity and high support capacity, due to the cementation provided by salts at union of solid material particles, when they are in a dry state. However, changes in its moisture content or an increase in saturation modify the properties described above, generating problems of instability, settlement and/or collapse, causing damage to structures built on these materials, due to the loss of support capacity. Soils with these characteristics predominate in northern Chile, where there is an arid climate with high evaporation rates and low precipitation rates.

In an engineering project related to the construction of tailings dams in the presence of saline soils, during the design stage, the parameters and acceptability criteria are defined for its use as foundation material, and geotechnical considerations are adopted for its use as borrow material, usually obtained from the execution of field research campaigns, laboratory tests, technical background, and designer's own experiences in this type of soil, with the aim of safeguarding integrity of the work.

Based on the above mentioned, this work aims to provide recommendations that can be implemented during the construction stage of tailings dams, oriented to the role and the need to have a geotechnical engineer in the field, who has participated in the engineering designs and whose purpose is to verify compliance with the design intention and the implementation of considerations and acceptability criteria established in the technical specifications of the project.

**KEY WORDS:** Saline soils, collapse, tailings deposits, Geotechnical Engineer.

## 1 INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de desastres en los depósitos de relaves, tales como los incidentes ocurridos en Mount Polley en Canadá el año 2014, Fundão en 2015 y Brumadinho en 2019 en Brasil, destacan la necesidad de prestar una atención más minuciosa desde las campañas geotécnicas, diseño, construcción y hasta la operación de las obras.

Particularmente en el norte de Chile, donde la extracción de cobre y otros minerales es una actividad prominente, la construcción de depósitos de relaves se enfrenta a desafíos únicos debido a las características geotécnicas de los suelos salinos. Estos suelos están sujetos al fenómeno del colapso por disolución de sales al entrar en contacto con el agua, lo que puede resultar en una mayor inestabilidad del suelo de fundación, pudiendo provocar potenciales fallas estructurales.

Para abordar estos desafíos, es imperativo establecer un riguroso control de riesgos durante la fase de construcción para garantizar que los diseños previstos se cumplan adecuadamente y que se implementen las consideraciones de aceptabilidad establecidas en las especificaciones técnicas del proyecto. En este contexto, el equipo de Ingeniería Residente, y especialmente el rol desempeñado por el Ingeniero Geotécnico, se convierte en un componente esencial para asegurar la integridad y seguridad de las obras.

## 2 PROBLEMAS ASOCIADAS A LOS SUELOS SALINOS

Los suelos salinos tienen un comportamiento complejo, debido a los problemas geotécnicos y/o a los impactos en los proyectos de Construcción que éstos pueden llegar a generar. El “contenido” de sales solubles es una variable, sin embargo, propiedades relacionadas a las condiciones ambientales (cambios de temperatura), naturaleza del solvente y a la cristalización o estructura, son características propias (desde el punto de estabilidad química del suelo) que pueden originar cambio en la matriz del material afectando su integridad. Otro aspecto, no menos importante y que se debe considerar a la hora de estudiar este tipo de material, es su estabilidad física. Variables como la densidad seca, estado natural o rellenos compactados cobran relevancia a la hora de evaluar fenómenos de disolución de sales o colapso.

El principal problema geotécnico que tienen los suelos salinos es que, al entrar en contacto con el agua, se producen disolución de las sales, que tiene como consecuencia un aumento de la inestabilidad del suelo de fundación, y como resultado, potencialmente se puedan ocasionar grandes deformaciones en el suelo. Estas deformaciones se pueden manifestar bajo dos formas: la primera, es a través de los asentamientos zonificados en el terreno, los cuales pueden llegar a dañar la estructura apoyada en las fundaciones, mientras que la segunda forma es a través del colapso de la estructura. Estos dos fenómenos se producen debido al lavado de las sales solubles, dado al contacto del material con un solvente (por ejemplo, el agua proveniente de lluvias o infiltraciones), lo cual genera un aumento de espacios vacíos en el

suelo producto de la disolución, lo cual hace descender al terreno, provocando grandes asentamientos, colapsos o agujeros de gran dimensión conocidos como socavones.

## 3 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SALINOS

Los suelos salinos ubicados al norte de Chile (identificados en el presente estudio) están compuestos principalmente por arenas y gravas limosas mal graduadas con finos no plásticos. En ciertas zonas, es posible encontrar gravas fuertemente cementadas, generalmente de origen aluvial, con contenido de limos. En áreas particulares, es posible encontrar materiales granulares con contenidos de arcilla, lo cuales aumentan el actuar de las sales a la hora de cementar las partículas de suelo.

Los suelos salinos, como su nombre lo indica, contienen de “medio” a un “alto” contenido de sales solubles, siendo el contenido de sulfatos el predominante en zonas más cordilleranas. Estas sales afectan de manera importante a estructuras que se proyecten sobre estos suelos, ya que el contenido de sales se cristaliza con las partículas del material granular teniendo como consecuencia una alta cementación del suelo, la cual puede incrementar si se tiene un contenido de finos mayor al 10%.

El contenido de humedad presente en el terreno es relativamente bajo o prácticamente nulo, encontrándose materiales prácticamente secos. Esto, se debe principalmente a la condición de aridez que existe en el norte del país. Lo anterior, tiene como consecuencia que la densidad natural y la densidad seca del suelo sean prácticamente las mismas, a excepción, de resultados a ensayos que se realicen sobre muestras obtenidas a través de sondajes, los cuales pueden alcanzar niveles freáticos en profundidad o ser afectados por la metodología de perforación (por ejemplo, la utilización de agua).

A nivel superficial, es posible encontrar dos tipos de suelo típicos de la zona norte, el primero es la “chusca” que generalmente tiene un espesor que varía entre 0,30 m a 0,8 m (partículas no cementadas) y el “Caliche”, el cual se puede encontrar bajo la chusca o en zonas superficiales (partículas cementadas), generalmente su espesor varía aproximadamente entre 0,5 a 2 m. Este último, contiene de medio a un alto contenido de sales solubles, lo que los hace muy resistentes pero inestables cuando entran en contacto con el agua u otro tipo de solvente. La **Ilustración 1** presenta una estratigrafía tipo encontrada en el norte de Chile.



*Ilustración 1: Estratos de suelos salinos típicos del norte de Chile*

#### 4 ROL DEL INGENIERO GEOTÉCNICO EN TERRENO

En América Latina, la gestión del equipo de Ingeniería Residente, compuesto por profesionales multidisciplinarios con un conocimiento detallado del proyecto, es un servicio ampliamente demandado para obras de depósitos de relaves. A pesar de ello, no siempre se reconoce la importancia del liderazgo de este equipo en terreno. Se requiere no solo que el profesional este calificado y tenga experiencia en la construcción de depósitos de relaves, sino que también haya tenido la oportunidad de participar en el equipo de diseñadores del proyecto en sus distintas fases, en particular, en la fase de ingeniería de detalle. Esta característica proporciona un nivel adicional de seguridad al servicio de ingeniería en el terreno, ya que el ingeniero geotécnico conoce y comprende los aspectos clave del diseño desarrollado para el proyecto, lo que le permite anticiparse a situaciones específicas y resolver cualquier impacto o desviación que pueda surgir durante el proceso constructivo, evitando así posibles retrabajos afectando el tiempo de construcción.

El profesional líder del equipo de ingeniería residente es el Ingeniero Geotécnico, respaldado por un equipo multidisciplinario de ingenieros. Este equipo se involucra en todas las etapas del proceso constructivo y es responsable de velar por el cumplimiento de la intención de diseño mediante un seguimiento continuo de la obra, asegurando que se materialice y se desarrolle de acuerdo con los términos de referencia asociados a los documentos técnicos del

proyecto, que incluyen normativas, planos y especificaciones técnicas, entre otros.

Este nivel de entendimiento le permite al Ingeniero Geotécnico evaluar los principales elementos y actividades que están asociadas a la correcta construcción del depósito de relaves, incluso aquellos que no están explícitamente mencionados en los documentos técnicos del proyecto.

De esta manera, según el avance de obra, en los siguientes apartados se destacan la importancia de involucrar al Ingeniero Geotécnico en la construcción de depósitos de relaves construidos sobre suelos salinos.

##### 4.1 Excavaciones: Avance a nivel de sello de fundación

Es sabido que la competencia del terreno de fundación y su aceptación se describan en los planos y especificaciones técnicas del proyecto. Sin embargo, existe una variable geotécnica que no siempre se aborda en este tipo de documentos y está relacionada con las características intrínsecas del material y cómo influyen en el comportamiento de la estructura. Aunque los antecedentes geológicos-geotécnicos son parte de la información que se debe desarrollar en el proyecto de ingeniería, su comprensión e interpretación debe ser abordada por el Ingeniero Geotécnico en cualquier fase de estudio. Este aspecto es clave para evaluar el terreno sobre el cual se fundará la estructura.

La evaluación del emplazamiento que puede proporcionar el Ingeniero Geotécnico, basada en estudios hidrogeológicos, de peligro sísmico, riesgos geológicos, y la caracterización y descripción de rocas, suelos y sedimentos, incluyendo el estudio de propiedades, contenidos y tipos de sales, le otorga una visión integral que permite dar directrices y recomendaciones en terreno respecto a:

- Identificar potenciales cambios de materialidad del terreno o suelos no reconocidos durante las diferentes etapas de ingeniería.
- Determinar ensayos adicionales que puedan ser requeridos en función del tipo de suelo (o problema geotécnico), con el fin de confirmar los parámetros establecidos en el diseño y así resguardar la integridad de la obra.
- Evaluar una menor o mayor profundización de nivel de excavación estipulada por la ingeniería de detalle, con el objetivo de garantizar el retiro de materiales no competentes, particularmente aquellos cementados por sales que participen de la estructura del suelo de fundación con un alto índice de colapso.
- Optimizar el diseño de ingeniería mediante la incorporación de nuevos antecedentes que no hayan sido identificados en campañas de terreno ejecutadas previamente y que se visualicen como oportunidad de reducción en volumetría de corte.
- Según las características particulares de cada proyecto o las aptitudes del profesional a cargo, el Ingeniero Geotécnico podrá aprobar/liberar sellos de excavación/fundación.

Continuando con el análisis de la variable geotécnica, el problema que presentan los suelos salinos, al entrar en contacto con el agua, es la disolución de las sales, que tiene como consecuencia un aumento de la inestabilidad del suelo de fundación. Esta inestabilidad del suelo de fundación puede resultar en grandes deformaciones, la cual provoca asentamientos del tipo colapso que podrían dañar la estructura apoyada sobre él. El lavado de las sales solubles al entrar en contacto con el agua provoca un aumento en los espacios vacíos en el suelo debido a la disolución, lo que puede resultar en un hundimiento del terreno y, en ocasiones, en la formación de socavones.

Entendido el contexto geotécnico, y retomando las consideraciones establecidas para el proyecto en cuanto a la aceptabilidad de sello de fundación, es esencial complementar este proceso con una metodología de aceptación.

Esta metodología propuesta busca establecer criterios de evaluación a nivel superficial, una vez se hayan alcanzado las cotas proyectadas en los planos para la fundación de la estructura. Su objetivo es evaluar y aprobar el sello de excavación final, garantizando así el cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto. A través de esta metodología, se pueden verificar los

parámetros y criterios de competencia del suelo de fundación (ver **Ilustración 2**).

#### 4.1.1 *Etapas 1: Evaluación de las Condiciones de Sitio*

Antes de alcanzar el nivel de sello de fundación, el contratista de movimiento de tierra deberá solicitar la inspección del Ingeniero Geotécnico para evaluar las características visuales del terreno y definir si las condiciones del sitio son adecuadas para continuar con el proceso de realización de ensayos que permitan validar el nivel de sello de fundación alcanzado. Este proceso se debe llevar a cabo de manera anticipada para prever cualquier modificación de diseño que pueda realizar el Ingeniero Geotécnico en el terreno, evitando tiempos de espera cuando se alcance la elevación de diseño.

Durante estas inspecciones, se recomienda lo siguiente:

- Descartar la presencia de estratos de material altamente cementado por sales u otro tipo de materiales no contemplado en el diseño, que puedan encontrarse en abundancia en profundidades mayores;
- Verificar que no existan materiales que no hayan sido caracterizados durante las campañas geotécnicas ejecutadas previamente en las diferentes etapas de ingeniería.
- Descartar la presencia de fallas o estructuras prominentes en la superficie o estribos del sello de fundación.

Después de inspeccionar el área y confirmar la ausencia de materiales no competentes, se procede a liberar la zona para continuar con la etapa 2 (ver ítem 2.1.2). En caso de encontrar tales materiales, se recomienda lo siguiente:

- Evaluar la potencia del estrato cementado por sales mediante la realización de calicatas de inspección cuya profundidad dependerá del tipo de material encontrado. Si se observa que el material es aislado y de potencia acotada, se concentrarán los esfuerzos en retirarlo. Sin embargo, si el material presenta una alta potencia, se deberá excavar hasta extraerlo por completo, y se deberán evaluar los impactos de una excavación más profunda, tales como posibles interferencias al ampliar la excavación o evaluar posibles cambios en los taludes.
- Si el estrato de material competente se proyecta y se extiende dentro del área a una profundidad mayor, se debe evaluar la realización de ensayos in situ para determinar la competencia del sello de excavación. Estos ensayos pueden incluir pruebas de placa de carga con saturación a nivel de sello de fundación o pruebas de saturación realizadas en las calicatas ejecutadas para la inspección (ver punto 4.1.1). Estas pruebas permitirán evaluar el potencial de disolución de sales que posee el terreno. Además, el ingeniero geotécnico podrá solicitar ensayos especiales de laboratorio, tales como pruebas de colapso, para evaluar la competencia del terreno. Basándose en los resultados de estos ensayos, se tomará la decisión de continuar excavando hasta alcanzar terreno competente. Es importante evaluar los impactos de una excavación más profunda antes de proceder con

esta acción, tales como posibles interferencias debido a la extensión de los taludes de excavación. Alternativamente, si luego de las pruebas realizadas los materiales se consideran competentes, pueden integrarse como parte del sello de fundación y se mantiene el nivel de excavación alcanzado.

#### 4.1.2 Etapa 2: Ensayos de Caracterización

Cuando se alcanza el sello de excavación de la estructura, se procede a realizar ensayos de caracterización que permita comprobar que el tipo de suelo encontrado coincide con las características del material pensado durante el diseño del proyecto. De esta manera, se debe considerar la evaluación de ejecutar los siguientes ensayos en terreno:

- **Distribución granulométrica:** Las curvas presentes en toda el área de emplazamiento de la estructura deberán estar dentro de la banda descrita por el proyecto. Es importante destacar que los suelos salinos estudiados del norte de Chile generalmente clasifican como arenas limosas, con presencia de gravas.
- **Densidad in situ:** Según recomendaciones de algunos estudios (citados en las referencias) y antecedentes recopilados (y analizados) desde los resultados de informes de laboratorio (para caracterizar el terreno de muros de contención para un depósito de relaves que, por temas de confidencialidad, no se mencionan) se considera que valores de densidad seca por sobre las 2,0 t/m<sup>3</sup> indican resultados satisfactorios respecto al potencial grado de colapso. Esto implica que, en caso de que los suelos salinos entren en contacto con algún solvente, el nivel de sello de fundación no debería presentar riesgo de daños por disolución de sales.
- **Porcentaje de Sales Solubles Totales:** Según la experiencia, los antecedentes recopilados (estudios citados en las referencias y otros documentos, que, por temas de confidencialidad, no se mencionan) las recomendaciones de los autores, para profundidades de hasta 6 m, los contenidos de sales solubles totales son en promedio menores a 10%, sin descartar la posibilidad de encontrar áreas o estratos con un porcentaje mayor.
- **Ensayo Placa de Carga:** Se puede realizar el ensayo de placa de carga vertical con el propósito de obtener el módulo de reacción del terreno a través del gráfico de esfuerzo vs deformación. Este ensayo, permitirá determinar el potencial de colapso del suelo de fundación.
- **Ensayo de Infiltración:** Es fundamental realizar ensayos de infiltración en terreno a una escala mayor que los ensayos de laboratorio. Esto permite confirmar los parámetros de permeabilidad utilizados en los modelos durante el diseño de ingeniería.

Ensayos especiales podrán ser requeridos en el contexto que el ingeniero geotécnico requiera antecedentes adicionales o se

requiera aprobar un nivel de sello de fundación con materiales que no hayan sido considerados en la ingeniería de detalles.

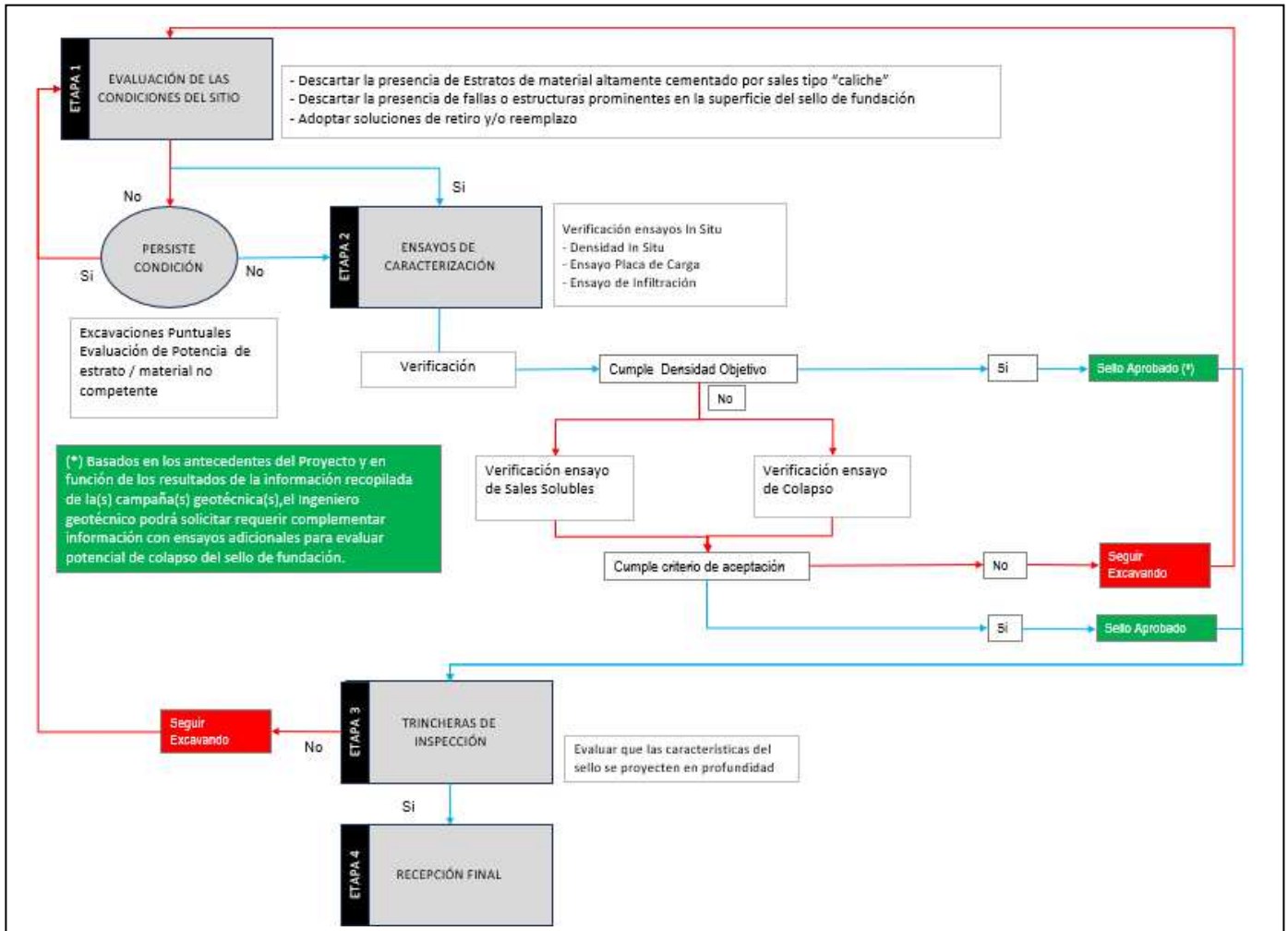
#### 4.1.3 Etapa 3: Ejecución de Trincheras

En paralelo a la ejecución de ensayos de caracterización mencionado en el punto 4.1.2, se recomienda llevar a cabo la ejecución de trincheras para evaluar las condiciones geotécnicas del sector y descartar estratos no competentes. La frecuencia y ubicación de las trincheras deberá ser determinada por el Ingeniero Geotécnico en base a los perfiles geológicos-geotécnicos desarrollados durante las fases de ingeniería.

Se propone que las dimensiones propuestas de las trincheras tengan dimensiones de 5 m de largo por 2 metros de profundidad, mientras que el ancho será determinado por la pala del equipo de mayor envergadura que ejecute esta actividad).

#### 4.1.4 Etapa 4: Recepción Final

Una vez recibidos los resultados de los ensayos solicitados en la etapa 2 (ver ítem 2.1.2), los cuales deben cumplir con los requerimientos del proyecto, y confirmada la continuidad de las características del sello de excavación en profundidad según la etapa 3 (ver ítem 2.1.3), el Ingeniero Geotécnico procederá a liberar el sello de fundación.



**Ilustración 2:** Flujograma referencial para recepción sello de fundación

En caso de que alguna de las etapas descritas anteriormente no se cumpla, se recomienda que el contratista de movimiento de tierras continúe excavando a una profundidad adicional de 2 m adicionales de excavación y repita el procedimiento definido para este fin (Etapa 1).

Es importante destacar que el ingeniero geotécnico está facultado para brindar apoyo al contratista de movimiento de tierras en todo este proceso en caso de ser requerido. Sin embargo, éste realizará seguimiento constante a las actividades en terreno para evitar cualquier desviación al procedimiento.

#### 4.2 Sistema de drenaje

Considerando la información del modelo hidrogeológico, que incluye el nivel freático, la cantidad y tipos de acuíferos, la conductividad hidráulica, las direcciones de flujo y la interacción entre el agua superficial y subterránea, así como la función del

sistema de drenaje de las obras principales de un depósito de relaves, que es captar filtraciones que se produzcan hacia la fundación o terraplén del muro, se recomienda que el ingeniero geotécnico tenga la facultad de:

- Evaluar la construcción del sistema de drenaje con la finalidad de identificar potenciales segregaciones o contaminación en los materiales de relleno.
- Evaluar la correcta continuidad de las diferentes zonificaciones de materiales que comprometen al sistema de drenaje, con el fin de permitir el correcto empalme y funcionamiento de la obra.
- Evaluar la aceptabilidad de materiales del sistema de drenaje.

En algunas ocasiones, los materiales que componen el sistema de drenaje se obtienen de empréstitos o canteras ubicadas y

autorizados al interior de la faena donde se construirá el depósito. Para este fin, se debe desarrollar un plan de producción que busca generar estos materiales. Sin embargo, la gestión de calidad para garantizar que cumplan con los requisitos del proyecto, particularmente en lo que respecta a la distribución granulométrica implica varios procesos (explotación, transporte chancado, selección) para obtener resultados satisfactorios. Esta etapa representa el principal desafío del proyecto en términos de generación de material, ya que es donde se encuentra la mayor dificultad para alcanzar la banda requerida por el diseño.

Dado este contexto, es fundamental que el ingeniero geotécnico evalúe cualquier modificación en las características del material drenante en términos de granulometría, para que pueda cumplir con la banda de diseño (involucrando la sección drenante y flujo esperado en estos elementos). En este sentido, debe tener la facultad de solicitar ensayos adicionales para evaluar la conductividad hidráulica del material (coeficiente de permeabilidad) en el marco de analizar y verificar las propiedades que le permitan asegurar la integridad y funcionamiento del sistema de drenaje.

El manejo de suelos salinos en el sistema de drenaje es crucial. Es fundamental controlar el contenido de sales en los materiales utilizados en estas obras para prevenir posibles obstrucciones en las tuberías y alteraciones en la permeabilidad del suelo, lo que podría conducir a obstrucciones o afectar el funcionamiento del sistema de drenaje.

#### 4.3 Sistema Control de Filtraciones

Para controlar las filtraciones en muros, existen diversas soluciones que pueden ser adoptadas en proyectos de construcción. Estas soluciones van desde la instalación de los diferentes tipos de geosintéticos, hasta la implementación de sistemas drenantes contruidos en el talud aguas arriba de los muros, zanjas corta fugas, entre otras alternativas.

Además, el uso de materiales de protección ya sea de forma individual o combinados con geosintéticos, puede ser una medida efectiva para prevenir la erosión en el talud del muro.

Teniendo en cuenta estos criterios durante la fase de diseño del proyecto dentro del proceso de ingeniería de detalle, en la etapa de construcción, el ingeniero geotécnico tiene herramientas adicionales para:

- Evaluar en terreno la correcta compactación de los materiales implica más que simplemente realizar ensayos prácticos, como el ensayo de cono de arena o densímetro nuclear. También implica una evaluación desde la perspectiva del diseño, lo que puede requerir modificaciones en los procedimientos para optimizar recursos y reducir el tiempo en terreno;
- Evaluar la integridad de los materiales dispuestos en el sistema de drenaje, verificando su correcta disposición y/o cumplimiento a las dimensiones indicadas en los planos y documentos técnicos del proyecto, y
- Evaluar en general la disposición adecuada de los traslapes y la orientación de los paneles, así como el

despliegue correcto de los geosintéticos, con el fin de prevenir la necesidad de aplicar grandes esfuerzos en la soldadura (en el caso de geomembranas) que puedan comprometer su integridad.

#### 4.4 Instrumentación Geotécnica

Dependiendo del parámetro que se desee monitorear, existen varias alternativas que se pueden emplear según las necesidades de cada proyecto.

El Ingeniero Geotécnico comprende que la instrumentación por sí sola no garantiza la seguridad de un depósito de relaves en lo que respecta a la medición de parámetros de interés. Su eficacia depende de una interpretación precisa de los datos proporcionados por estos dispositivos, que debe ser complementada con un monitoreo adecuado. Esto permite anticipar posibles problemas o desviaciones relacionadas con la efectividad del sistema de drenaje, la estabilidad de los rellenos de muros, desplazamientos, deformaciones, entre otros aspectos.

Debido a esto, en función de lo que se pretenda medir, el Ingeniero Geotécnico podrá autorizar modificaciones al sistema de instrumentación ante eventuales interferencias que puedan suscitarse en terreno, en el caso que:

- Existan inconvenientes en terreno durante el posicionamiento en profundidad de la instrumentación. Esto se manifiesta cuando, durante el proceso de instalación o habilitación de los instrumentos, surgen problemas relacionados con materiales mal identificados, como terrenos con elevada resistencia a la excavación que impiden alcanzar la cota de instalación de ciertos instrumentos. En tales casos, es necesario evaluar si es factible instalar los instrumentos a una nueva profundidad, basándose en la información complida durante las fases de ingeniería y la identificada en terreno. Esta información se convierte en la base para tomar decisiones operativas;
- Existan interferencias o se visualicen potenciales hallazgos no considerados durante la fase de Ingeniería y sean encontradas en la etapa de construcción. Será labor del Ingeniero Geotécnico aprobar la nueva ubicación de los instrumentos geotécnicos propuestos para el proyecto, así como también el trazado de banco de ductos en caso de considerar, y
- La inclusión o cambios de tecnologías de la instrumentación geotécnica propuesta en el proyecto puede ser necesaria debido a condiciones no identificadas en las etapas de ingeniería que contempló el proyecto.

El conocimiento en la filosofía del diseño permite al Ingeniero Geotécnico evaluar y proyectar la nueva ubicación de los instrumentos de manera que coincida con áreas de interés donde generalmente se llevan a cabo análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio límite, análisis dinámicos, zonas propensas a la acumulación de agua o con características topográficas particulares, entre otros aspectos.

En otro aspecto, no menos importante, la materialización de la red de instrumentación geotécnica debe ser considerada como una “obra especializada”, por lo cual, debe ser llevado a cabo en terreno por contratistas especializados y expertos en la materia. Sin embargo, la modalidad contractual con la cual se ejecutan este tipo de proyectos (depósitos de relave), le transfiere toda la responsabilidad al contratista de movimiento de tierras, quien subcontrata los servicios de instalación, brindando el soporte necesario para que los trabajos se ejecuten de acuerdo con los requerimientos técnicos del proyecto.

Es en este traspaso de responsabilidades que se generan los inconvenientes en terreno, debido a que el responsable final (contratista de movimiento de tierra) no es especialista en el tema, y pese a la asesoría que le pueda brindar el contratista de instrumentación, existen situaciones durante la construcción que se ven superados por temas técnicos, por lo que requieren del apoyo del equipo de ingeniería residente, liderado por el Ingeniero Geotécnico, para resolver las interrogantes durante el avance de obra.

Es por este motivo que el Ingeniero Geotécnico es una pieza clave para la aprobación y revisión de las actividades de instrumentación geotécnica en terreno, quien además da soporte y se encarga de dar respuesta a los requerimientos de información levantados por parte del contratista.

#### 4.5 Rellenos en Muros y Obras Perimetrales

En proyectos de depósito de relaves, se identifica que el contratista de movimiento de tierras opta por dividir la superficie del relleno del muro, en sectores o frentes de trabajo, de manera tal que le permita realizar las actividades de humectación, escarificado, relleno y compactación o terminación de capas en paralelo.

Sin embargo, debido a interferencias con otras especialidades, disponibilidad de equipos en los frentes de trabajo, aclaraciones y/o soluciones solicitadas a través de documentos técnicos (como los requerimientos de información) que aún están pendientes de respuesta, u otras situaciones imprevistas, pueden causar retrasos en el avance de algún frente de trabajo. Estas situaciones obligan al contratista a concentrar sus esfuerzos en áreas donde no haya restricciones para continuar con el progreso del proyecto

Esta situación, que, aunque no es deseada, se reconoce que ocurre y provoca un crecimiento no uniforme de los rellenos. Por lo tanto, se tiende a trabajar de manera escalonada y en distintas etapas para el crecimiento del muro.

Es en este escenario donde cobra relevancia el rol del Ingeniero Geotécnico. En colaboración con el equipo de construcción, deben planificar cuidadosamente las actividades para asegurar la correcta secuencia constructiva. En el caso de rellenos adyacentes a otros ya existentes, se debe prestar especial atención a la creación de un empalme entre capas adecuado y controlado, para lo cual se requiere una protocolización adecuada que garantice la trazabilidad en la obra. Respecto a lo anterior, se recomienda que el Ingeniero Geotécnico presta atención a:

- Evitar empalmes de rellenos en sondas donde se proyecte el sistema de drenaje.
- Evitar empalmes transversales a la sección del muro con capas de relleno de corta longitud.
- Evitar empalmes de rellenos con gran diferencia de capas, especialmente cuando esta diferencia sea mayor a 2-3 m.

Las superficies que no sean cubiertas oportunamente y que sufran algún daño, o que según la evaluación in situ del ingeniero Geotécnico requieran intervención, deberán ser retrabajadas y acondicionadas nuevamente antes de colocar la siguiente capa de relleno.

Además, en la misma línea de acción, es crucial asegurarse de que la compactación se realice hasta el borde del talud, manteniendo un sobreancho de la plataforma (SAP). Posteriormente, se debe perfilar cualquier excedente y dejar el talud final compactado de acuerdo con las dimensiones exigidas en los planos y documentos técnicos del proyecto.

#### 4.6 Inconvenientes en ensayos In Situ

Para realizar los ensayos mencionados en el subcapítulo 4.1, se debe considerar lo siguiente respecto a los ensayos de densidad e infiltración in situ.

Ensayos de densidad in situ mediante cono de arena:

- Debido a la cementación de los suelos salinos, se recomienda realizar la perforación con extrema delicadeza, evitando desmenuzarse grandes sobretamaños (cementados), los cuales podrían afectar la geometría de la perforación y, por ende, los resultados del ensayo.

Ensayos de densidad in situ mediante densímetro nuclear:

- Debido a la alta rigidez que presentan los suelos salinos, es complejo realizar ensayos mediante densímetro nuclear, que es el método que comúnmente se utiliza en la construcción de depósitos de relaves. Esto se debe a las dificultades para enterrar la varilla de perforación y posteriormente retirarla para introducir el vástago del equipo. Por consiguiente, se sugiere perforar la superficie del suelo con una broca del mismo diámetro que el vástago del densímetro nuclear, lo que facilita la toma de la densidad mediante este método.

A pesar de lo anterior, se recomienda que los ensayos que se realicen mediante densímetro nuclear sean contrastados y confirmados con los ensayos que se realicen mediante el cono de arena.

#### Ensayos de infiltración:

- El ensayo de infiltración más comúnmente utilizado en suelos salinos es el tipo Porchet. Este método implica la excavación de una cavidad con geometría definida, la cual se llena de agua. Posteriormente, la excavación se satura y se procede a realizar ensayos de carga constante y variable. Sin embargo, otros métodos de infiltración como el doble anillo o el permeámetro de Guelph no son adecuados para suelos salinos, principalmente debido a su alta rigidez provocada por la cementación de las partículas.

## 5 CONCLUSIONES

Respecto a las recomendaciones geotécnicas durante la construcción de depósitos de relaves con suelos salinos, se destaca que no existe una normativa o reglamento que regule esta etapa de un proyecto, dada las características propias y particularidades de estos mismos. A pesar de lo anterior, a continuación, se resumen las siguientes recomendaciones que podrían ser consideradas para esta etapa:

- Planificar campañas de investigación geotécnicas adecuadamente durante las fases de ingeniería de un proyecto de tal manera que sea posible caracterizar correctamente el suelo salino.
- En base a la caracterización geotécnica de los suelos salinos prospectados, se recomienda establecer un flujograma de decisión respecto a los parámetros de densidad seca, contenido de sales solubles y potencial de colapso, de esta manera, quedará definido el protocolo de aceptación de los suelos de fundación.
- Considerar las características particulares y de producción que deben presentar los materiales que se utilicen como rellenos masivos o para un sistema de drenaje de un depósito de relaves.
- La necesidad de incorporar un Ingeniero Geotécnico durante la construcción o peraltamiento de un depósito de relaves, el cual será capaz de velar por el cumplimiento de la intención de diseño, verificando que los materiales encontrados en terreno sean de igual o mejor calidad geotécnica que los proyectados durante la ingeniería de diseño, analizar y aprobar cambios de diseño, aprobación de suelos de fundación, resolver consultas del contratista de construcción, entre otras.
- Es importante destacar que la incorporación de un equipo de ingeniería residente en el proyecto no excluye la necesidad de contar con equipos encargados del control de calidad (QC), aseguramiento de calidad (QA) e inspección de obra. Todos estos roles son fundamentales para garantizar que el proyecto se construya según los criterios establecidos por el diseñador

Respecto a al criterio de aceptación de los suelos de fundación con contenido de sales solubles se recomiendan 4 etapas para evaluar la condición y competencia del terreno:

- Etapa 1: Evaluación de las condiciones de sitio: Descartar la presencia de estratos de material altamente cementado por sales tipo “caliche”.
- Etapa 2: Ensayos de caracterización: Realizar los ensayos definidos durante la ingeniería de detalles para la aprobación de suelos de fundación.
- Etapa 3: Ejecución de trincheras: Se realizan excavaciones para descartar materiales no competentes en profundidad.
- Etapa 4: Recepción final suelos de fundación: Evaluar antecedentes de las etapas anteriores para la aprobación del sello de fundación.

Finalmente, debido a lo complejo que es el estudio de suelos salinos, se recomienda que se realicen pruebas en terreno para evaluar su competencia. Estos ensayos permitirán al Ingeniero Geotécnico en terreno evaluar in situ las condiciones que presentan las diferentes condiciones en estado natural que presentan los suelos salinos.

## 6 AGRADECIMIENTOS

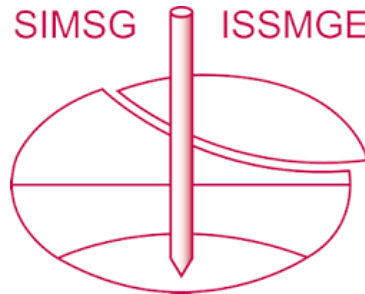
Los autores agradecen a la empresa Stantec y a sus líderes por brindar el espacio y el tiempo para que los autores pudieran elaborar el documento.

## 7 REFERENCIAS

- Acevedo P., Fonca C. & Olguín R. 2004. *Suelos salinos del norte de Chile – Parte I Origen, distribución y características de los depósitos*. V Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica, 2004. Santiago, Chile.
- Acevedo P., Fonca C. & Olguín R. 2004. *Suelos salinos del norte de Chile – Parte II Estructura y Propiedades Índices - Metodología*. V Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica, 2004. Santiago, Chile.
- Acevedo P., Fonca C. & Olguín R. 2004. *Suelos salinos del norte de Chile – Parte III, A. Asentamientos para diferentes estructuras de suelo. B. Lineamiento de nuevas etapas de desarrollo*. V Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica, 2004. Santiago, Chile.
- Behzad, Fatahi, Hady, Khabbaz y Sudip, Basack. 2011. *Effects of Salinity and Sand Content on Liquid Limit and Hydraulic Conductivity*. Australian Geomechanics Volume 46 No 1.
- Corvalan, J & Herve, F. 1996. *Large Dams in Chile*. s.l. : Chilean National Committee on Large Dams, 1996.
- Espinoza, J 2022. *Tesis titulada “Estudio de Asentamiento por Efecto de Disolución de Sales en Arenas Limosas Compactadas”*. Universidad de Chile, 2022. Santiago, Chile.
- Latorre, C 2021. *Tesis titulada “Análisis de la Colapsabilidad de Suelos Salinos en Fundaciones de Muros para Depósitos de Relaves”*. Universidad de Chile, 2021. Santiago, Chile.

- NCh3394. (2016). *Suelo salino — Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras.*
- Olguín R 2006. *Tesis titulada “Geotécnica de los Suelos Salinos del Norte de Chile”.* Universidad de Chile, 2006. Santiago, Chile.
- Osama, Nusier, Ahmed, Al-Mufty & Rasheed, Jaradat. 2008. *Determination of Saline Soils Specific Gravity.* Jordan Journal Of Civil Engineering, Volume 2.
- Palma C. & Riquelme J. 2018. *Suelos salinos y su uso en rellenos.* X Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica, 2018. Valparaíso, Chile.
- Sanhueza C. & Valenzuela M. 2018. *Caracterización geotécnica para el diseño de obras en suelos salinos del norte de Chile.* X Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica, 2018. Valparaíso, Chile.
- Swan, C. 2017. *Foundations on Weak and/or Compressible Soils.* The University of Iowa.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*