

## **SUELOS SALINOS DEL NORTE DE CHILE**

### **PARTE II ESTRUCTURA Y PROPIEDADES INDICES - METODOLOGÍA**

Roberto Olguín Pizarro  
Universidad de Chile  
[rolquin@ing.uchile.cl](mailto:rolquin@ing.uchile.cl)

Claudio Foncea Navarro  
Universidad de Chile  
[cfoncea@ing.uchile.cl](mailto:cfoncea@ing.uchile.cl)

Pedro Acevedo Moyano  
Universidad de Chile  
[pacevedo@ing.uchile.cl](mailto:pacevedo@ing.uchile.cl)

#### **RESUMEN**

Para igual contenido de sales existen diferencias significativas en las deformaciones según la fábrica del perfil del suelo salino. Se describen los conceptos químicos asociados a las sales presentes en los depósitos naturales y se proponen metodologías para la determinación y caracterización de los suelos salinos en términos de nuevos parámetros-índice que consideran la salinidad y la estructura.

#### **1. INTRODUCCION**

Los suelos salinos se caracterizan por contener en sus vacíos porcentajes variables de sales que pasan a ser críticos cuando se concentran en costras o estratos que, al disolverse producen daños en las estructuras. Entre los agentes causales, se tienen el riego de jardines, rompimiento de tuberías de redes de agua potable o alcantarillados y otras situaciones puntuales como zonas para lavado de vehículos y aviones.

Básicamente, el mecanismo que origina el colapso del suelo es el siguiente: las sales inicialmente presentes en estado sólido (cristalizado) actúan como cementante de las partículas no solubles componentes del suelo, lo cual otorga al suelo de fundación características de alta rigidez, alta resistencia al corte y gran capacidad de soporte. Sin embargo, a partir del momento en que el agua disuelve las sales, las propiedades descritas anteriormente se reducen drásticamente, originando grandes deformaciones que provocan importantes daños sobre las estructuras. Las pruebas de carga realizadas por Skorin (ref.1) y Tamblay (ref.2), que aparecen en Parte III de este estudio, muestran las diferencias de comportamiento señaladas antes y después de la disolución de las sales.

## 2. SOLUBILIDAD DE LAS SALES

Tal como fue mencionado en la Parte I de este trabajo, en los depósitos salinos del norte de Chile es posible encontrar aniones de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), y cationes de Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

Los compuestos más frecuentes reconocidos en la caracterización química de los suelos salinos son:

- Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ): Halita.
- Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ): Yeso y Anhidrita.
- Nitrato de Sodio ( $\text{NaNO}_3$ ): Salitre.
- Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ): Calcita.

Estas sales se consideran *solubles* cuando en contacto con un solvente forman una *solución acuosa*. En sectores habitacionales, el solvente es el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), en tanto que en la lixiviación industrial ("heap-leaching") y en general en plantas mineras, los solventes son ácidos específicos.

En este estudio se denomina *solubilidad química* a la cantidad máxima de un tipo de sal que puede ser disuelta en un solvente en condiciones de presión y temperatura determinadas (en general, se mide en gramos de la sal requeridos para saturar 100 g de agua destilada). Esta propiedad química define la "facilidad" con que una sal se disuelve. Se entiende que a mayor valor de *solubilidad química*, la sal se disuelve con más facilidad y rapidez. Se define aquí el término *solubilidad analógica* que corresponde a la cantidad de sales que se disuelven por goteo, que simulan pérdidas de alcantarillado, o micro chorros a presión que simulan ruptura de tuberías.

La Tabla 1 entrega valores de la *solubilidad química* de las sales más comunes que se encuentran en el norte de Chile.

**TABLA 1. SOLUBILIDADES QUÍMICAS DE LAS SALES**

TIPO DE SAL	FÓRMULA QUÍMICA	SOLUBILIDAD QUÍMICA [g de sal / 100 g de agua]
Carbonato de Calcio (Calcita)	$\text{CaCO}_3$	$1.3 \times 10^{-3}$
Sulfato de Calcio (Yeso)	$\text{CaSO}_4$	$2.22 \times 10^{-1}$
Cloruro de Sodio (Halita)	$\text{NaCl}$	$3.59 \times 10^1$
Nitrato de Sodio (Salitre)	$\text{NaNO}_3$	$8.15 \times 10^1$

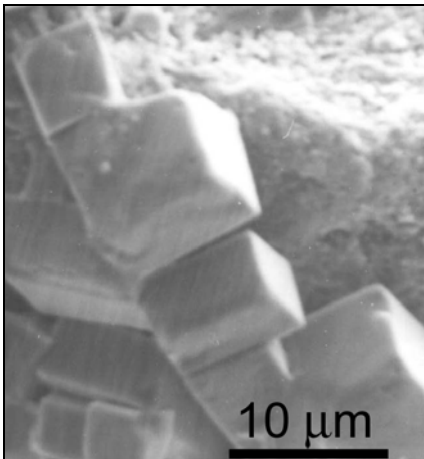
Complementando la información entregada en Parte I de este estudio, los fenómenos naturales que permiten explicar en mayor detalle la formación de los depósitos salinos son:

- a) **Aumento de la concentración sales en el solvente:** Este fenómeno explica la formación de los depósitos salinos, ya que en climas de extrema aridez, característicos de la zona, la tasa de evaporación supera largamente a la tasa de

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

lluvias. De esta forma, las sales disueltas precipitan una vez que superan la solubilidad límite.

- b) **Descenso de la temperatura de la solución:** Al disminuir la temperatura, la solubilidad también disminuye, lo que puede originar la precipitación de la sal sin variación en su concentración. Este efecto depende del tipo de sal, llegando incluso a ser nulo en algunos casos, como por ejemplo, en el cloruro de sodio (halita). Los depósitos salinos del norte grande pueden por este efecto precipitar durante la noche. En este horario las temperaturas ambientales descienden considerablemente, sobre todo en las zonas de la depresión central, y regiones altiplánicas



**Figura 1. Cristales de cloruro de sodio (halita) adheridos a un grano de arena**

La velocidad de disolución de un mismo tipo de sal depende de la estructura definida por las condiciones de evaporación durante su depositación. Se presentan estructuras ordenadas o amorfas según el *grado de cristalinidad* que es el grado o nivel de ordenamiento que alcanzan los aniones al formar su estructura cristalina. La Figura 1 muestra un caso de estructura ordenada con alto grado de cristalinidad determinada a partir de una evaporación lenta y gradual.

Si la evaporación es violenta, la sal precipitada desarrollará una estructura amorfa, la cual se caracteriza por poseer una alta superficie específica y la reducida resistencia del cristal mismo.

Estas propiedades tienen una fuerte implicancia en el proceso de disolución del cristal; el de estructura amorfa, es decir, con un bajo grado de cristalinidad, se disuelve con más rapidez y facilidad que aquél de estructura más ordenada.

El grado de cristalinidad se puede medir a través de la Difracción de Rayos X.

### 3. TIPOS DE ESTRUCTURA DE SUELOS SALINOS

Las estructuras observadas en los suelos salinos son complejas. Están constituidas de partículas inertes de minerales primarios y secundarios (insolubles), aire y sales solubles que pueden estar presentes en forma cristalizada o amorfa.

Dos tipos de estructuras observadas, que establecen los márgenes entre los cuales pueden existir estructuras intermedias, son:

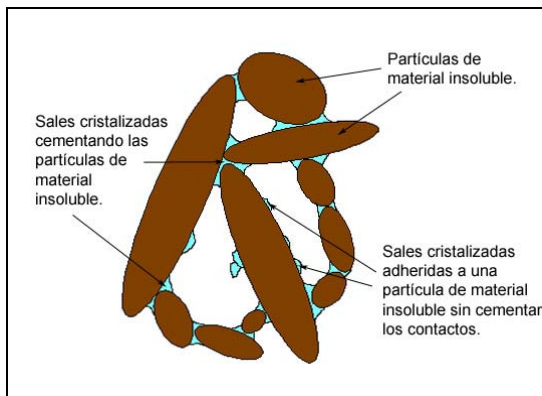
#### 3.1 Estructura soldada o macro porosa (Figuras 2 y 3)

La estructura soldada se caracteriza porque las fases suelo-sal-aire se han distribuido desarrollando una estructura permeable del tipo acuífero, donde el agua al percolar, logra saturar el suelo en forma relativamente rápida.

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

Las características propias de esta estructura son:

- Granulometría del material lixiviado (material natural al cual se le ha extraído la totalidad de sus sales solubles por agitación en agua destilada hirviente) presenta reducidos porcentajes (por debajo del 5%) de partículas bajo malla #200. La porosidad también depende de la uniformidad y del tamaño de partículas de la curva granulométrica; a menor coeficiente de uniformidad y a mayor tamaño de partículas, la estructura resulta obviamente más permeable.
- La presencia de sales cristalizadas actúa como cementante en los contactos entre las partículas granulares insolubles, desarrollando estructuras porosas, tipo castillo de naipes.
- La permeabilidad resultante permite el acceso fácil del agua que disuelve las sales cementantes, llevando la estructura al colapso.



**Fig 2. Esquema de estructura tipo soldada o macro porosa**



**Fig 3. Muestra natural inalterada. Estructura tipo soldada**

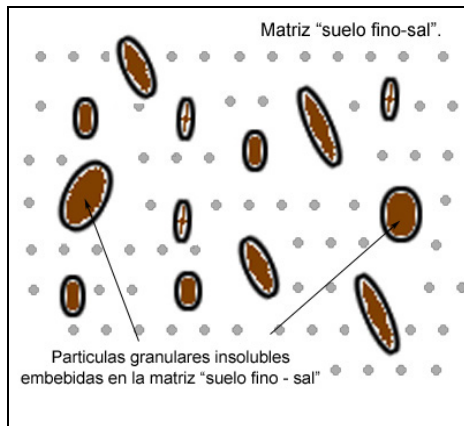
### 3.2 Estructura tipo matriz o micro porosa (Figs 4 y 5)

A diferencia de la estructura soldada, esta estructura se caracteriza por que los vacíos que existen entre las partículas granulares insolubles (minerales primarios) han sido ocupados por una matriz constituida por sales solubles y partículas de suelo fino (minerales secundarios). Esta matriz controla el comportamiento del material con baja permeabilidad. Características propias de esta estructura son:

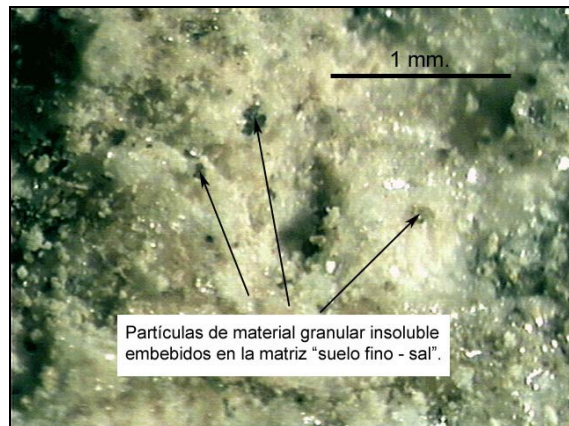
- El material lixiviado presenta cantidades significativas de material fino plástico (por sobre 10 %).
- Las sales presentes forman enlaces físico-químicos con el suelo fino que hacen que la matriz resulte aún más impermeable.
- En depósitos con alta cantidad de sales puede darse el caso en que éstas presenten un elevado grado de cristalinidad, lo que se traduce en bajas permeabilidades aún sin la presencia de suelos de grano fino.

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

- La baja permeabilidad dificulta la disolución de las sales, por lo que el potencial de colapso se reduce en relación al caso de estructura soldada para igual cantidad de sales presentes.



**Fig. 4. Esquema de estructura tipo matriz o micro porosa**

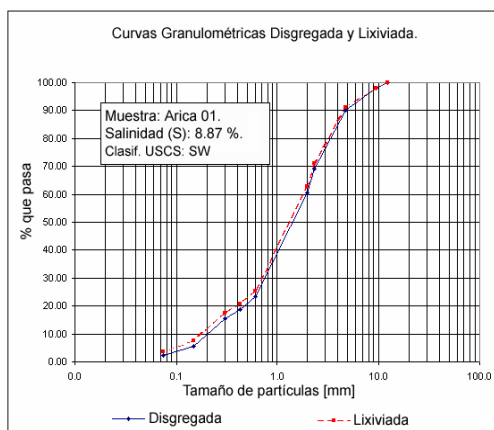


**Fig. 5. Muestra natural con estructura tipo matriz o micro porosa**

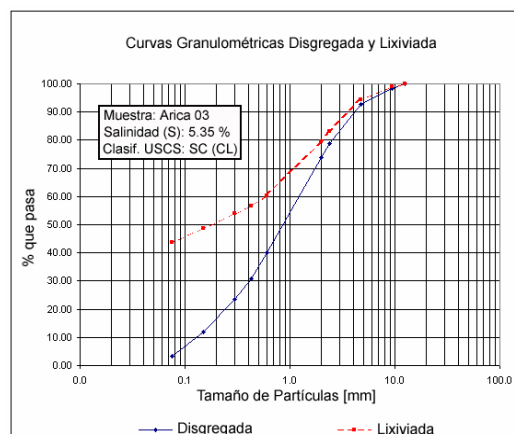
### 4. CRITERIOS DE CLASIFICACION DE ESTRUCTURAS DE SUELOS SALINOS

Tal como fue expuesto en el acápite anterior, la clasificación del tipo de estructura del suelo salino debe incorporar el grado de facilidad con que el agua pueda percolar a través del material disolviendo las sales existentes.

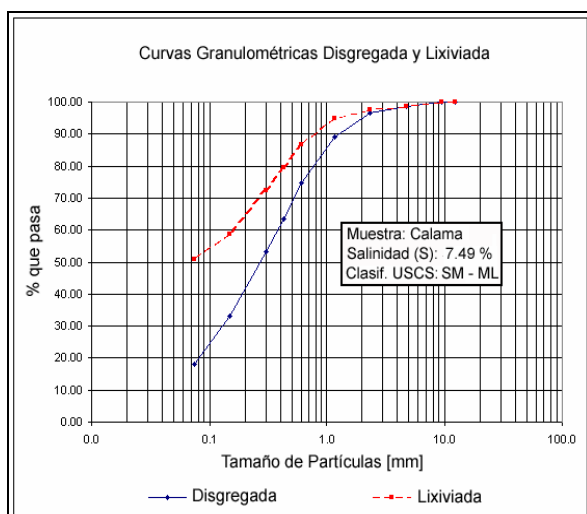
Una manera indirecta para clasificar el tipo de estructura, aparte de una inspección visual, es a través de la comparación de las curvas granulométricas del material natural disgregado y del material lixiviado. Las Figuras 6 a 8 muestran tres curvas granulométricas de suelos salinos diferentes.



**Fig. 6. Curvas granulométricas de material con estructura tipo soldada**



**Fig. 7. Curvas granulométricas de material con estructura tipo matriz**



**Fig. 8. Curvas granulométricas de material con estructura tipo soldada**

Las muestras de las figuras 6 y 8 corresponden a suelos de estructura macro porosas, provenientes de Arica y Calama respectivamente. Se observa que las curvas granulométricas de las Figuras 6 y 7 son similares y sin embargo, su clasificación es diferente debido a la plasticidad de sus finos, que al resultar arcillosos para la muestra de Arica le confiere una reducida permeabilidad.

Estos comportamientos fueron estudiados en laboratorio mediante la observación de los flujos de agua que percolaban a través de las muestras. Para esto, se montaron en cámaras triaxiales y se sometieron a saturación con las válvulas de drenaje abiertas.

Finalmente, cabe agregar que para obtener la curva granulométrica disgregada mencionada anteriormente, las partículas del material natural son separadas mecánicamente procurando utilizar una energía que no alcance a producir ruptura de partículas. La curva granulométrica lixiviada se obtiene del material lavado en el proceso de determinación de salinidad S.

## 5. MODELO DE FASES EN SUELOS SALINOS

### 5.1 Descripción del Modelo

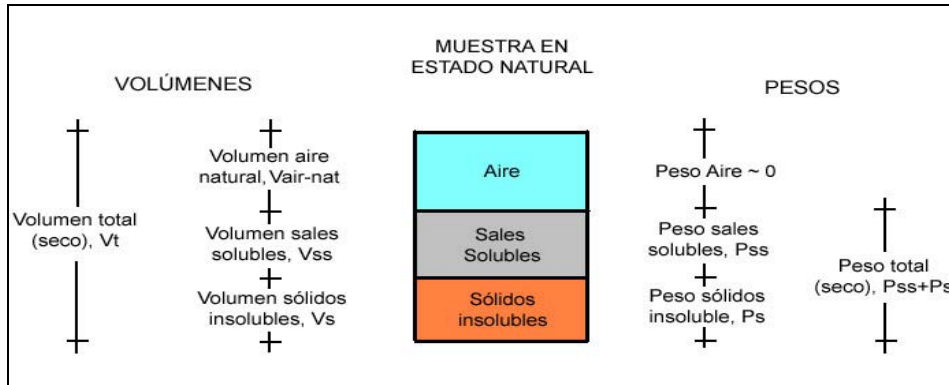
A partir de las observaciones mencionadas en acápite anterior, se propone un modelo que permite incorporar, además de la salinidad, la estructura del suelo salino en términos de sus vacíos. Con ello, se establece una relación con el potencial de colapso que, para un mismo grado de salinidad, va a diferir según el tipo de estructura. Este modelo considera las tres principales fases que constituyen los componentes del suelo salino. Estas son:

- material insoluble (partículas de materiales primarios y secundarios)
- vacíos.
- sales solubles totales

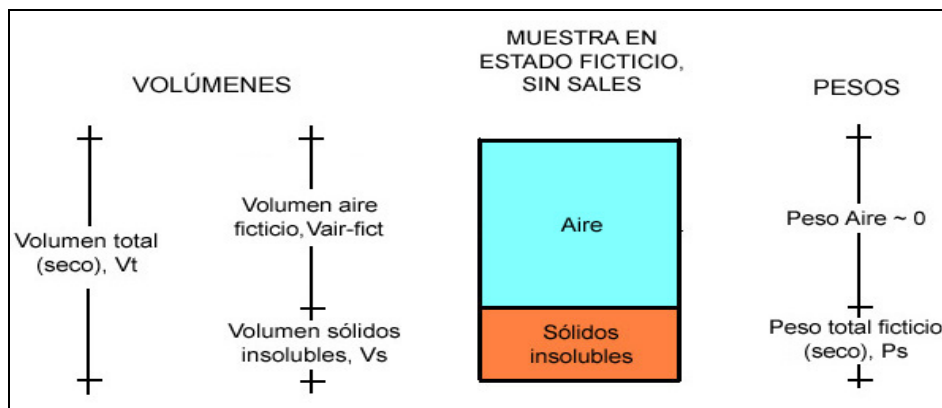
A pesar de reconocer que el agua es el agente desencadenante del proceso en estudio, se considera en este modelo el caso seco inicial donde el agua será la variable que podrá existir llenando parcial o totalmente los vacíos.

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

Un primer esquema aparece en Figura 9, representando las fases del suelo en su estado natural seco, es decir, con presencia de material inerte, sales solubles y aire.



**Fig. 9 Esquema del modelo de fases. Muestra en estado natural seco**



**Fig. 10 Esquema del modelo de fases. Muestra en estado lixiviado seco (sin cambio de volumen total)**

A partir de este esquema se construye otro que corresponde al estado donde todas las sales solubles han sido lavadas (Figura 10). Se mantienen constantes los volúmenes de suelo totales en ambos casos, de manera que el volumen de sales se transforma en volumen de aire.

A partir del modelo de fases planteado es posible obtener los parámetros de estado que se describen en la tabla 2 (ver figuras 9 y 10 para notación de pesos y volúmenes).

**TABLA 2. PARAMETROS DE ESTADO EN SUELOS SALINOS**

PARAMETRO	ECUACION
Salinidad de la muestra, S	$S = \frac{P_{SS}}{P_S}$
Densidad natural seca del material con sales, $\gamma_{d-C/S}$	$\gamma_{d-C/S} = \frac{P_S + P_{SS}}{V_T}$
Densidad natural de las sales solubles, $\gamma_{d-salino}$	$\gamma_{d-salino} = \frac{P_{SS}}{V_T} = \frac{S \cdot \gamma_{d-C/S}}{S + 1}$
Densidad natural seca del material sin sales, $\gamma_{d-S/S}$	$\gamma_{d-S/S} = \frac{P_S}{V_T} = \gamma_{d-C/S} - \gamma_{d-salino}$

## 5.2 Definición del Parámetro-Índice Relación Potencial de Vacíos (RPV)

El nuevo parámetro-índice *Relación Potencial de Vacíos* se define como la razón entre el volumen de aire de la muestra lixiviada (volumen de aire ficticio) y el volumen de aire de la muestra en estado natural. Este parámetro da cuenta del volumen potencial de vacíos que puede generar la completa disolución de las sales. Se puede calcular a través de las siguientes ecuaciones:

$$RPV = \frac{V_{air-fict}}{V_{air-nat}} = \frac{e_{fict}}{e_{aire-nat}} \quad (1)$$

donde:

$$e_{fict} = \frac{V_{air-fict}}{V_S} = \frac{G_S \cdot \gamma_0}{\gamma_{d-S/S}} - 1 \quad (2)$$

$$e_{air-nat} = \frac{V_{air-nat}}{V_S} = G_S \cdot \gamma_0 \left[ \frac{S+1}{\gamma_{d-C/S}} - \frac{S}{\gamma_{SS}} \right] - 1 \quad (3)$$

con:

$G_S$ : Gravedad específica de las partículas del material insoluble, sin sales.

$\gamma_0$ : Peso unitario del agua a 4 °C, (1 t/m<sup>3</sup>).

$\gamma_{SS}$ : Peso unitario de las sales solubles. Se adopta el valor de 2.3 t/m<sup>3</sup>.

Metodología de ensayos de laboratorio para la determinación de los parámetros-índice y de estado

Mediante ensayos de laboratorio es posible determinar S,  $\gamma_{d-C/S}$  y  $G_S$  de la siguiente manera:

- de un trozo representativo de muestra natural,  $\gamma_{d-C/S}$  se obtiene el peso unitario seco con el uso de parafina y sifón. Debido a que la parafina no disuelve las sales, el valor de la densidad seca obtenida resultará válido. En relación a las humedades naturales de los depósitos salinos del norte que, por las



## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

características climáticas, es baja a nula, se requiere que el trozo de material inalterado se haya secado al horno a 60 °C<sup>1</sup> antes de ser cubierto por la parafina.

- La salinidad  $S$  se obtiene utilizando la metodología para la determinación de sales solubles totales señalada en la norma Nch 1444/1 of 80 y LNV 8-84.
- El valor de la gravedad específica de los sólidos,  $G_s$ , se obtiene mediante la aplicación de la norma ASTM D 854-92 ("Standard Test Method for Specific Gravity of Soils") al material no soluble lixiviado en el proceso para la determinación de la salinidad  $S$ .

A partir de estos tres parámetros, es posible obtener los demás parámetros utilizando las relaciones indicadas en Tabla 2 y en acápite 5.2

## 6. DISCUSION

A partir de todos los conceptos y metodologías planteados en este artículo, cabe destacar lo siguiente:

- Los dos tipos de estructuras definidas (macro y micro porosas) hacen referencia a comportamientos hidrológicos límites y opuestos. En terreno es posible encontrar estructuras de permeabilidades intermedias, así como también alternancias de estas estructuras en estratigrafías naturales.
- El método aquí propuesto de clasificación estructural a partir de la observación de la granulometría y los límites de Atterberg del material lixiviado no puede representar todas las características intrínsecas de la estructura del suelo salino. Por ello, es conveniente complementarlo con otro tipo de observaciones, como por ejemplo microscopía mineralógica y electrónica.
- El modelo de fases considera solamente las sales solubles totales, sin hacer distinción entre los distintos tipos de aniones y cationes que existen en la muestra natural. Según lo planteado, esta diferencia puede influir en la velocidad con la que un tipo de sal cristalizada se disuelva al momento de ser saturada. Por ejemplo, una estructura soldada con sales del tipo cloruro de sodio perdería la cementación salina de forma más rápida que una con sales del tipo sulfato de calcio. De todas formas, si el tiempo de inyección de agua es lo suficientemente largo como para disolver todo el sulfato de calcio, la magnitud de los asentamientos deben ser similares.
- Bajo el mismo punto de vista planteado en el párrafo anterior, el grado de cristalinidad también influye en la velocidad de disolución de los cristales de sal. Tal como se señalaba anteriormente, una sal mejor cristalizada demora más en diluirse que una de estructura amorfa.
- Los valores del peso específico de las sales,  $\gamma_{ss}$  (en t/m<sup>3</sup>) de las sales solubles más comunes en los depósitos salinos chilenos son: Cloruros de Sodio: 2.2, Sulfatos de

---

<sup>1</sup> Se recomienda esta temperatura de secado debido a que ciertos tipos de sales cambian sus propiedades físicas y químicas al ser sometidas a temperaturas mayores que 60 °C.

## **V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica**

Calcio: 2.33, Nitratos de Sodio: 2.26 y Carbonatos de Calcio: 2.7, por lo que adoptar un valor de 2.3 para el conjunto de sales solubles totales resulta razonable.

### **7. CONCLUSIONES**

- 1) Una definición de criterios para clasificar los suelos salinos resulta indispensable para visualizar y comprender su comportamiento geotécnico
- 2) La metodología propuesta de clasificación estructural a partir de la observación de la granulometría y límites de Atterberg del material lixiviado es un buen indicador del tipo de estructura.
- 3) El tipo de estructura que el suelo posee tiene dos efectos en el comportamiento del suelo salino. El primero se relaciona con la mayor o menor facilidad con que el agua pueda fluir a través de esa estructura, en tanto que el segundo responde a la magnitud del potencial de colapso por disolución de sales.
- 4) Se define un nuevo parámetro asociado a la salinidad del suelo, su estructura natural con sales y su estructura final ficticia una vez disueltas las sales. Este parámetro es la relación potencial de vacíos, RPV, y permite evaluar el potencial de colapso del suelo como se indica en la Parte III de este trabajo.
- 5) Se describen nuevas metodologías, que resultan directas y simples, para obtener tanto los parámetros-índice, entre ellos RPV, como la clasificación estructural.

### **8. REFERENCIAS**

1. Skorin, Antonio, (1971), "Efectos de los Suelos Salinos sobre Estructuras", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile
2. Tamblay, Guillermo A., (1983), "Comportamiento de Fundaciones Apoyadas en Suelos Salinos" Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile
3. Castellan, Gilbert W., (1971), "Physical Chemistry", Second Edition
4. Erickssen, George, (1963), "Geology of the Salt Deposits and the Salt Industry of Northern Chile"