

**SUELOS SALINOS DEL NORTE DE CHILE**  
**PARTE III A - ASENTAMIENTOS PARA DIFERENTES**  
**ESTRUCTURAS DE SUELO**  
**B - LINEAMIENTOS DE NUEVAS ETAPAS DE**  
**DESARROLLO**

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)

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

**RESUMEN**

Ensayos edométricos con saturación sobre diferentes muestras de suelos salinos revelan que la estructura de estos suelos, para mismos niveles de salinidad, producen diferentes deformaciones. Se cierra este estudio con recomendaciones de los lineamientos a seguir a fin de complementar y desarrollar los conocimientos hasta aquí adquiridos sobre estos suelos, que incluyen los aportes de distintas disciplinas complementarias.

**1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

Continuando con las bases y criterios establecidos en la Parte II de este estudio, se procedió a realizar un conjunto de ensayos de consolidación para observar el comportamiento de estos suelos de distintas estructuras frente a la saturación y disolución de sales.

A partir de experiencias de placa de carga con inundación realizadas antes en terreno (refs. 1 y 2), de los resultados de los ensayos de laboratorio indicados en las etapas anteriores de este estudio y de los criterios de diseño y especificaciones constructivas utilizados en la solución geotécnica de fundaciones de distintos tipo de estructura, incluyendo las observaciones de daños y comportamiento de obras civiles, se propone a discusión una metodología de terreno y laboratorio que al aplicarse también a obras y proyectos en estos suelos, incorpore criterios que incluyan las diferencias que el origen geológico de las depositaciones les imprime a estos suelos, así como otros aspectos relevantes como movilidad de sales, estructura y degradación de rigidez. Todo esto lleva a la necesidad de un nuevo enfoque para definir un sistema de clasificación de estos suelos con normativas preliminares de ensayos de laboratorio y terreno, propiedades-índice y metodologías de ensayos.

## 2. ASENTAMIENTOS VERSUS ESTRUCTURAS DE SUELO

### 2.1 Descripción de los Ensayos Edométricos.

Muestras de suelo salino inalterado fueron ensayadas en el edómetro convencional hasta alcanzar distintas cargas verticales. Las muestras fueron luego saturadas desde la base de la probeta. Para cada estado de carga se midieron las deformaciones verticales en el tiempo, tanto para las probetas secas como saturadas. La figura 1 ilustra este procedimiento.

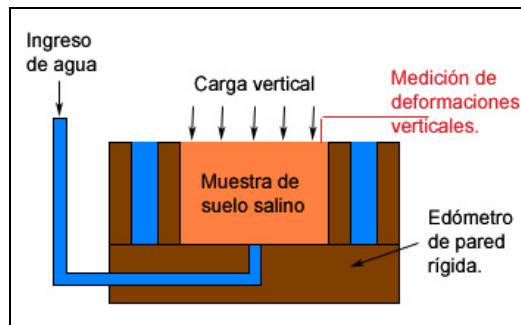


Fig. 1. Esquema del Ensayo Edométrico con Medición de Colapso.

Las condiciones de saturación aplicadas son las siguientes:

- Saturación para una carga vertical de  $2 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Uso de agua destilada a la temperatura ambiente.
- Saturación sin presión.
- El agua en el edómetro es substituida constantemente por agua destilada limpia de sales.

En la Figura 2 se muestra un resultado representativo.

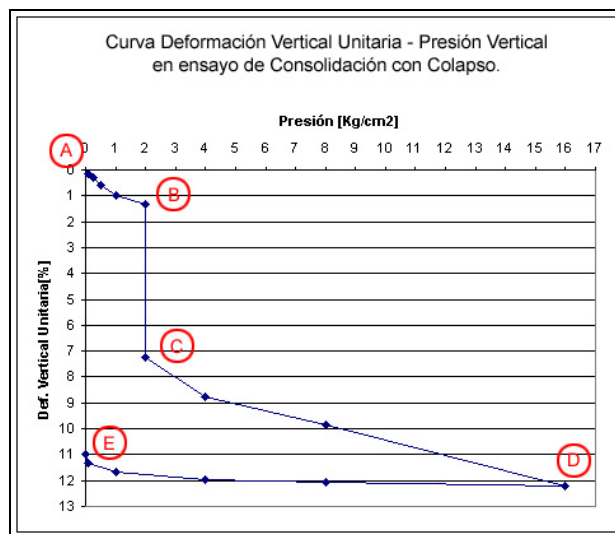


Fig. 2. Curva Representativa de Ensayo Edométrico.

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

En esta figura, los tramos indican:

- Tramo A – B: Curva carga deformación para probeta en estado seco.
- Tramo B – C: Deformación vertical producto de la saturación a carga constante.
- Tramo C – D: Curva por carga adicional de probeta saturada.
- Tramo D – E: Descarga.

Para cada estado de carga, los tiempos de medición fueron los necesarios para el desarrollo total de las deformaciones verticales. Estos tiempos pueden ser extremadamente largos para deformaciones por saturación y disolución de sales.

### 2.2 Características Principales de Muestras Ensayadas.

Las tablas 1 y 2 resumen los parámetros-índice de las 6 muestras de suelos salinos naturales ensayadas.

**TABLA 1. PROPIEDADES PRINCIPALES DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS**

NÚMERO MUESTRA	NOMBRE MUESTRA	ESTRUCTURA TIPO (*)	S [%]	$\gamma_{d-C/S}$ [t/m <sup>3</sup> ]	G <sub>s</sub>
1	Arica 01	1	8.87	1.87	2.65
2	Arica 02	1	7.2	1.92	2.7
3	Arica 03	2	5.35	2.05	2.65
4	Calama	1	7.49	1.86	2.72
5	A. H. 01	1	82.03	2.01	2.68
6	A. H. 02	2	110	1.96	2.73

- (\*) 1 estructura del tipo soldada  
2 estructura del tipo matriz

**TABLA 2. PARAMETROS-INDICE DE MUESTRAS ENSAYADAS**

Nº MUESTRA	$\gamma_{d-salino}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{d-S/S}$ [t/m <sup>3</sup> ]	e <sub>fict</sub>	e <sub>air-nat</sub>	RPV (*)
1	0.152	1.718	0.543	0.441	1.232
2	0.129	1.791	0.508	0.423	1.200
3	0.104	1.946	0.362	0.300	1.205
4	0.130	1.730	0.572	0.483	1.183
5	0.906	1.104	1.427	0.471	3.028
6	1.207	0.933	1.925	0.619	3.108

(\*) RPV es la relación potencial de vacíos definida en Parte II de este estudio, y se define como el cociente entre el volumen de aire de la muestra lixiviada y el volumen de aire de la muestra natural

### 2.3 Resultados y Correlaciones Obtenidas.

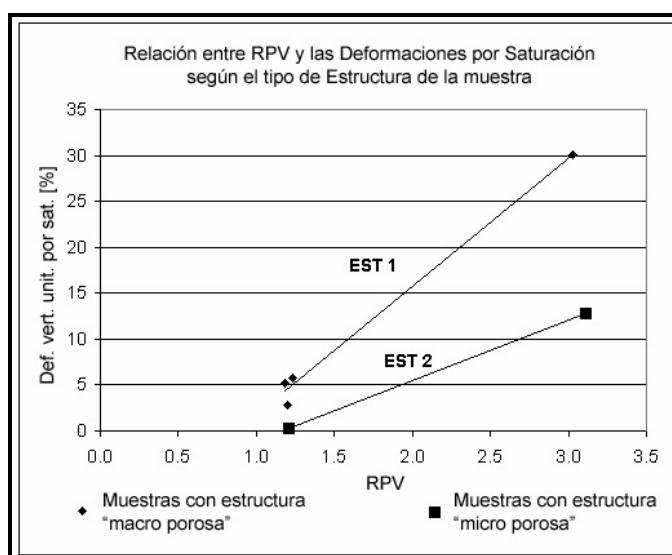
En tabla 3 se presenta un resumen con las deformaciones verticales unitarias que se midieron al momento de saturar las muestras (tramo B – C de la figura 2).

**TABLA 3. DEFORMACIONES VERTICALES UNITARIAS AL SATURAR LA MUESTRA EN ENSAYO EDOMÉTRICO**

**Carga Vertical = 2 kgf/cm<sup>2</sup>**

NOMBRE MUESTRA	DEFORMACIÓN VERTICAL UNITARIA POR SATURACIÓN, [%]
Arica 01	5.75
Arica 02	2.88
Arica 03	0.22
Calama	5.22
A. H. 01	30.02
A. H. 02	12.78

Graficando estas deformaciones versus los RPV expuestos en tabla 2, se obtiene:



**Fig. 3. Correlación entre RPV y deformaciones unitarias unitarias al saturar, según tipo de estructura para  $\sigma_v = 2 \text{ kg/cm}^2$**

#### 2.4 Discusión de los Resultados

- La figura 3 permite observar que las muestras ensayadas, a pesar de tener salinidades (S) y relaciones potenciales de vacíos (RPV) similares, presentan deformaciones significativamente distintas una vez ocurrida la disolución de sales. (Comparar la muestra 3 con las 1,2 y 4 y la muestra 6 con la muestra 5).

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

- En este trabajo se han definidos dos tipos de estructuras como márgenes de referencia (macro y micro porosas) debido a que establecen un rango entre los cuales pueden existir estructuras intermedias. También se reconoce que es posible encontrar alternancias de estas estructuras en las estratigrafías naturales.
- Los ensayos edométricos que aparecen en figura 3 corresponden a un valor de la tensión vertical fijo, igual a  $2 \text{ kg/cm}^2$ . Para ampliar el estudio del comportamiento de los suelos salinos, conviene analizar la variación de algunos parámetros, como por ejemplo, la carga vertical al momento de la saturación, la presión con la que ingresa el agua al suelo salino, la temperatura de ésta y la composición química del líquido solvente. Esto último pensando en depósitos mineros, industriales o rellenos sanitarios.

### 2.5 Conclusiones Relativas a la Influencia de la Estructura de Suelo

- 1) Los asentamientos que se producen en los suelos salinos a causa de la disolución de las sales cementantes, dependen no solo de la cantidad de sales que éstos poseen (criterio que es utilizado habitualmente en la práctica), sino que también del tipo de fábrica. Es por esto que, en estudios geotécnicos, la cuantificación de las probables deformaciones (potencial de colapso) debe realizarse observando en conjunto dos aspectos: el tipo de estructura y el valor del parámetro Relación Potencial de Vacíos (RPV) . Esta idea se apoya en los siguientes argumentos:
  - a) Estructuras macro porosas conllevan elevados potenciales de colapso que pueden confiablemente ser evaluadas a través del parámetro RPV.
  - b) Estructuras micro porosas, conllevan para mismos niveles de salinidad, potenciales de colapso mucho menores que las estructuras macro porosas. Sin embargo, al poseer reducida permeabilidad, el suelo de estructura micro porosa, ofrece además una mayor resistencia al flujo, lo que reduce aún más la movilidad de las sales solubles, proporcionando así un margen adicional de seguridad que no ha sido hasta aquí mencionado, frente a aumentos de humedad.
  - c) En estos casos conviene determinar si las condiciones de saturación a las que pueda estar expuesto el suelo de fundación (presión y temperatura del agua, composición química del solvente y nivel de sobrecarga del suelo) son capaces de disolver las sales presentes y así desarrollar los potenciales colapsos.
- 2) Considerando la reducida cantidad de muestras y ensayos aquí incluidos frente a la gran cantidad y variedad de depósitos salinos mencionados en Parte I de este trabajo, se hace necesario un mayor número de ensayos asociados a proyectos reales a fin de validar y extender estas correlaciones a otros depósitos,
- 3) Además de ampliar y variar los parámetros de laboratorio analizados en este estudio como fue mencionado en la discusión, resulta necesario y recomendable realizar pruebas de terreno que permitan asociar los parámetros de laboratorio a comportamientos reales.

### 3 - LINEAMIENTOS PARA NUEVAS ETAPAS DE DESARROLLO

El estudio de suelos salinos, en sus partes I y II y III entrega dos enfoques de un mismo problema. En el primer trabajo el enfoque se desplaza desde una visión geológica centrada en la formación de los depósitos salinos buscando empalmar con el problema de ingeniería. En la segunda parte el enfoque se inicia a partir de ensayos de laboratorio que buscan representar el potencial de colapso, asociándolo al tipo de estructura del suelo salino.

Se reconoce la complejidad del problema en estudio, el cual no puede llevarse a simplificaciones excesivas ya que los factores que intervienen son numerosos y de variadas características que lo posicionan en un espacio multidisciplinario.

Antes de presentar proposiciones de nuevas metodologías de terreno y laboratorio se hace necesario incluir y analizar también experiencias ya realizadas de campo. Los efectos de la disolución de sales en la degradación de la rigidez original de un suelo salino, se presentan en figura 4 (ref. 2) que grafica los resultados de una prueba de carga, realizada sobre una costra salina de un perfil de coluvio costero (figura 5), con y sin inundación y con posterior acción dinámica simulada por golpes pos inundación. Se observa el colapso de la estructura de suelo por saturación, así como la deformación adicional por carga dinámica.

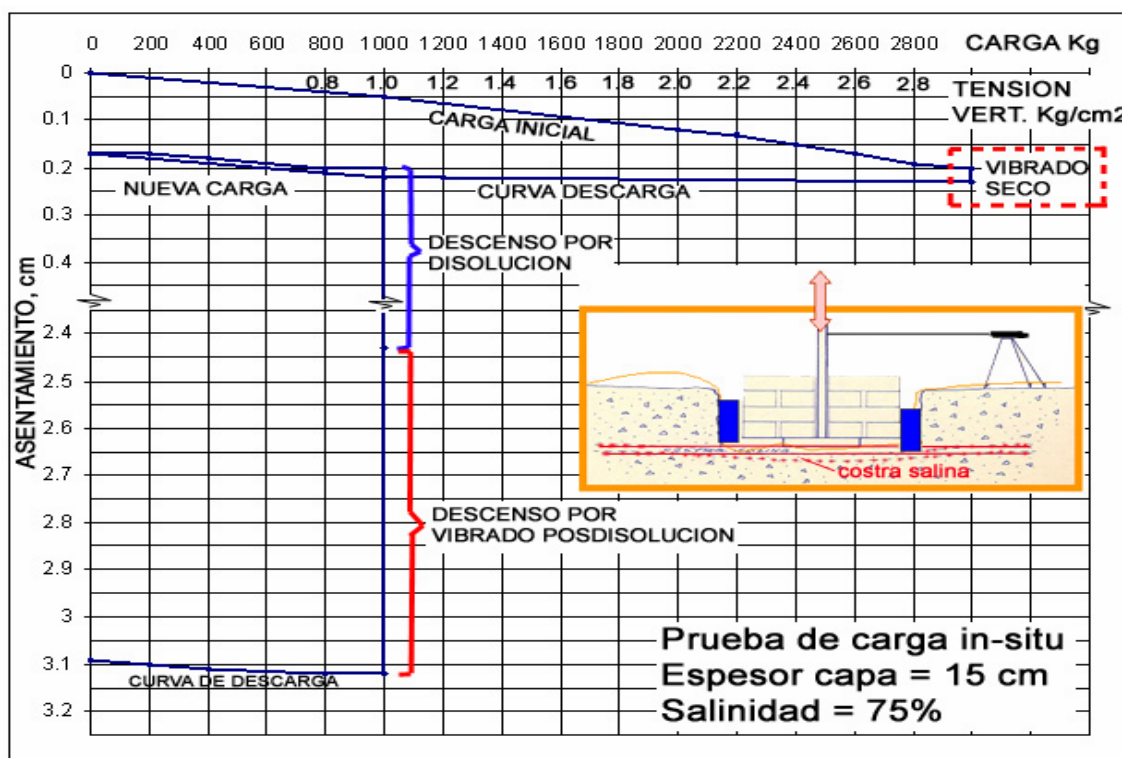


Fig. 4 Prueba de Carga In-Situ. Suelo Natural e Inundado (según Tamblay)

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

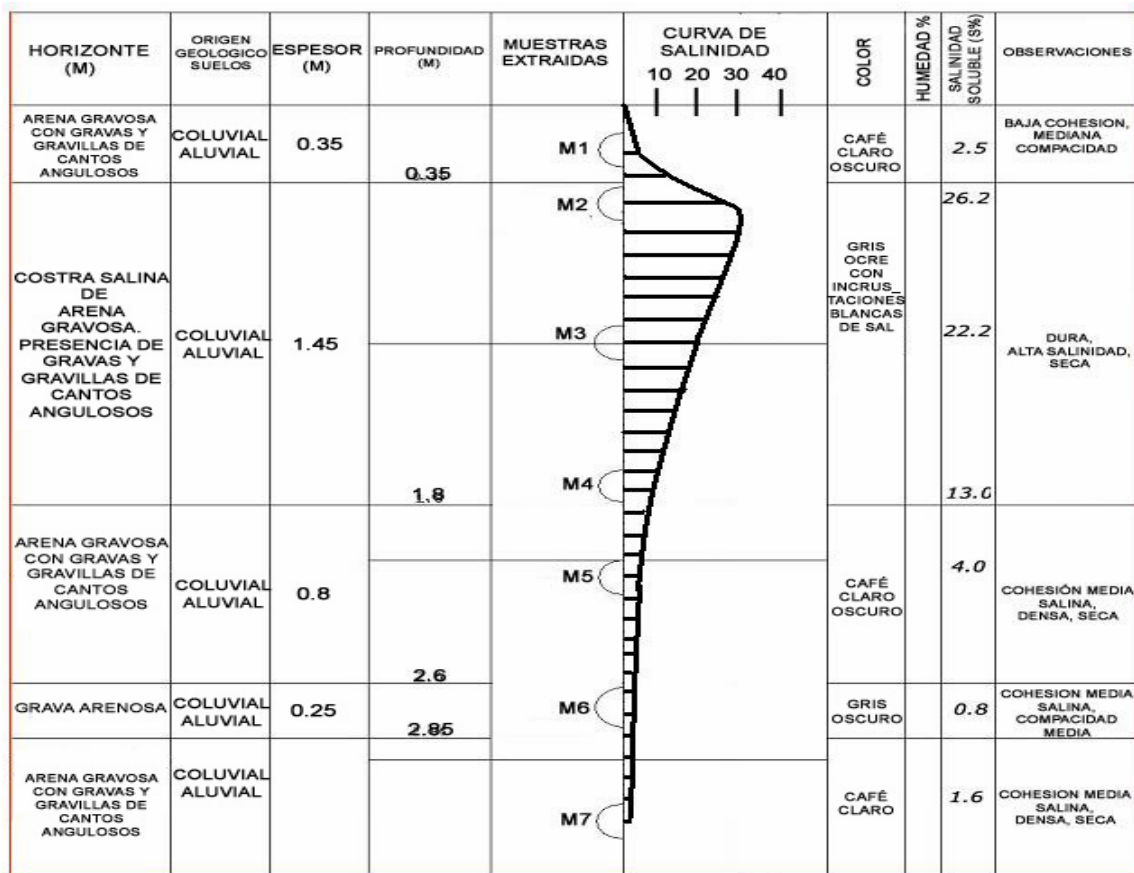


Fig. 5 Estratigrafía, Muestreo y Curva de Salinidad (según Skorin)

### 3.1 Metodología Propuesta para el Desarrollo del Conocimiento de los Suelos Salinos en el Norte de Chile

Se propone una secuencia de pasos, que incorporada en los diferentes problemas de ingeniería a resolver en estos suelos, permita un avance sistemático y efectivo en el desarrollo del conocimiento de estos suelos.

Esta secuencia, a discutir con los especialistas de ingeniería geotécnica, es en principio la siguiente:

1. Ubicar el caso en estudio dentro de una determinada faja longitudinal de depositación de acuerdo a la distribución y nomenclatura definida en la figura 3 de la Parte I de este trabajo.
2. Definir el tipo de depósito como indicado en los grupos de depositación de este estudio en Parte I

## V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica

3. Para cada caso, estudiar y definir las condiciones de la microcuenca, el tipo de roca que la delimita y las características morfológicas e hidrogeológicas de la depositación, Desde un punto de vista práctico, esta comprensión del fenómeno y sus mecanismos resultan de gran importancia, ya que la forma y tipo de depositación determinará también la movilidad del agua, sus posibilidades de acceso y de disolución de sales contenidas en el suelo y, en último término, permitirá realizar la mejor selección para la solución funcional más económica que asegure la estabilidad de la fundación, protegiéndola igualmente de la corrosión.
4. A través de calicatas, obtener muestras que permitan definir la curva representativa de salinidad y, al mismo tiempo, observar las características de estos materiales en relación a los aspectos indicados en párrafo anterior, así como su excavabilidad.
5. Normalizar criterios de clasificación y ensayos de suelos salinos que permitan obtener, por una parte, el contenido de sales totales - con particular atención a los cloruros y al yeso determinados por análisis químico – y la curva de salinidad (figura 5). Por otra parte, determinar en laboratorio las propiedades-índice tal como aparecen definidas en Parte II de este trabajo.
6. Siempre que resulte posible y justificado, realizar pruebas de carga en terreno de diseño simplificado para condiciones secas e inundadas, simulando efectos dinámicos pos-inundación.
7. Realizar ensayos edométricos sobre muestras inalteradas, similares a los indicados en Parte II de este estudio, para obtener la degradación de la rigidez después de la disolución de las sales.
8. Reconocer el tipo de estructura del suelo salino según lineamientos indicados en este trabajo y su tratamiento para lograr un sello estable no-agresivo a nivel del sello de fundación propuesto.

## 4. REFERENCIAS

1. Skorin, Antonio (1971) “Efecto de los Suelos Salinos sobre Estructuras” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
2. Tamblay, Guillermo (1983) “Comportamiento de Fundaciones Apoyadas en Suelos Salinos” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
3. Erickssen, George, (1963) “Geology of the Salt Deposits and the Salt Industry of Northern Chile”
4. Petrukhin, V.P.,(1993) “Construction of Structures on Saline Soils”