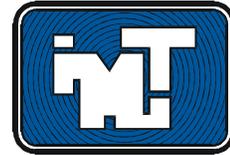




ISSN 0188-7297



---

# **ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CLORURO DE SODIO PARA SU USO EN LAS VÍAS TERRESTRES**

Paul Garnica Anguas  
Alfonso Pérez Salazar  
José Antonio Gómez López  
Edda Yhaaraby Obil Veiza

**Publicación Técnica No.201  
Sanfandila, Qro, 2002**

---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Estabilización de suelos con cloruro  
de sodio para su uso en las vías  
terrestres**

**Publicación Técnica No. 201  
Sanfandila, Qro. 2002**

---

---

Este trabajo fue desarrollado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Dr. Paul Garnica Anguas, Ing. Alfonso Pérez Salazar, M. en I. José Antonio Gómez López e Ing. Edda Yhaaraby Obil Veiza tesista de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

Se agradece a los técnicos Miguel Ángel Cervantes Nieto y Mario Antonio Pérez González la realización de los ensayos en el laboratorio, a la M. en C. Natalia Pérez García por los ensayos realizados en el equipo triaxial cíclico.

---

# Índice

---

<b>Resumen</b>	III
<b>Abstract</b>	V
<b>Resumen ejecutivo</b>	VII
<b>1. Antecedentes</b>	1
<b>2. Estabilización de suelos</b>	5
2.1 Clasificación de suelos con fines de estabilización	5
Parámetros esenciales en el reconocimiento de suelos, según el sistema Northcote	5
Identificación de los minerales de un suelo, según el sistema Northcote	6
2.2 Productos empleados en la estabilización de suelos	10
2.3 Estabilización con productos químicos	11
2.4 Estabilización con sales	11
2.5 Estabilización con cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ )	11
Estabilización de suelos con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )	12
Estabilización con cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ )	13
2.6 algunos criterios para la estabilización de suelos para pavimentos	16
2.7 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio	22
<b>3. Diseño del experimento</b>	25
3.1 Características de los materiales estudiados	25
Características de los suelos	25
Características de la sal	26
Análisis granulométrico de la sal en grano	27
3.2 Ensayes de laboratorio	28
Equipo utilizado en la determinación del módulo de resiliencia y resistencia a la compresión simple	28
Expansión libre	30
3.3 Elaboración de especímenes	31
Tiempo de curado	31
Preparación de probetas para los ensayos	32

<b>4.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>33</b>
4.1	Límites de Atterberg y pH	33
	Influencia de la sal en los límites de Atterberg	33
4.2	Resultados de los valores de pH	35
4.3	Características de compactación	36
4.4	Características de expansión	36
4.5	Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión	44
<b>5.</b>	<b>Recomendaciones y conclusiones</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>

## Resumen

---

Se presentan y discuten los principales resultados obtenidos en un estudio experimental, destinado a evaluar la estabilización con cloruro de sodio (NaCl) en suelos arcillosos, encaminados a la aplicación en terracerías de las vías terrestres. Se trabajaron dos suelos particularmente, El Salitre y Jurica, de la Ciudad de Querétaro, ambos con alto potencial de expansión. Se determinó la influencia de la sal en las propiedades físicas y mecánicas, variando los porcentajes de la sal adicionada al suelo.



## Abstract

---

This work presents and discusses the results obtained from an experimental study that was realized to assess the stabilization with NaCl. The Soils were obtained from El Salitre and Jurica neighborhood. Both soils were high compressibility. It was determinate the effect of the salt on the physical and mechanical properties of the soils analyzed, with different salt contents in the soil.



## Resumen ejecutivo

---

La estabilización de los suelos en la ingeniería práctica, particularmente en las vías terrestres, ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento esfuerzo deformación de los suelos.

El mejoramiento de los suelos ha atendido a diversos requerimientos, tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o compresibilidad, la estabilidad volumétrica ante la presencia de agua, entre otros, buscando en todos los casos, un buen comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil.

En los terrenos arcillosos, particularmente en climas áridos o semiáridos, es altamente probable encontrar problemas relacionados con inestabilidades volumétricas ante la ganancia o pérdida de agua. Existen en la práctica diversos métodos para estabilizar a tales suelos; cada método, utiliza diferentes agentes estabilizadores, entre los que se pueden encontrar:

- La cal
- El cemento Pórtland
- Productos asfálticos
- Ácidos orgánicos
- Resinas y polímeros
- Sales, entre otros

Incluso se ha utilizado la combinación de diferentes productos estabilizadores, así como la mezcla de suelos con el fin de dar soluciones óptimas a problemas particulares.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de suelos arcillosos, potencialmente expansivos, mezclados con cloruro de sodio. Es importante destacar que las sales han sido estudiadas, con fines de estabilización, desde hace varias décadas, entre las que se pueden citar el cloruro de potasio, el cloruro de magnesio, cloruro de bario, nitrato de sodio, carbonato de sodio, cloruro de calcio, cloruro de sodio, entre otros, sin embargo, solo algunas de ellas, por razones económicas, han podido ser aplicadas a la estabilización de terracerías. Particularmente, el cloruro de sodio por su bajo costo, es de los que más se han empleado en carreteras, en algunos casos con mayor o menor éxito dependiendo de las condiciones particulares del caso que se trate.

Los suelos estudiados corresponden a los sitios de El Salitre y Jurica. Se analiza la variación de las propiedades físicas y mecánicas de dichos suelos con la adición de sal, para en diferentes porcentajes. Se aplicó la sal con dos métodos diferentes, uno con la sal diluida en salmuera y otro en grano.

La salmuera es una solución compuesta por una cierta cantidad de sal, en peso, por cantidad de agua destilada; y la sal en grano se dosifica, en peso, por unidad de peso seco del material por estabilizar.

El método tradicional de adición de sal al estabilizar terracerías, es en peso de sal por peso seco de suelo, en este trabajo se analiza la adición con salmuera con la finalidad de aplicarla por medio de pipas directamente al suelo en el agua de compactación.

Las propiedades físicas aquí analizadas son los límites de consistencia y por ende su clasificación dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Potencial de Hidrógeno (pH), así como las características de compactación de dichos suelos analizados con el ensaye Próctor. Las propiedades mecánicas evaluadas son la resistencia a la compresión y el módulo de resiliencia.

Lo anterior con el fin de tener un panorama general del comportamiento mecánico del suelo tratado con sal en cuanto a su comportamiento mecánico en capas de terracería en estructuras de pavimento.

# 1 Antecedentes

---

Se presenta un breve tratado del origen, formación y los minerales constitutivos de los suelos, asimismo, se incluye una descripción de los principales tipos de arcillas así como la físico-química de éstas. Lo anterior con la finalidad de comprender el comportamiento de los suelos finos estabilizados, motivo del presente estudio.

Un mineral es una sustancia inorgánica y natural, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas o son fijas o varían dentro de límites definidos. Sus propiedades físicas más interesantes, desde el punto de vista de identificación son: el color, el lustre, la tonalidad de sus raspaduras, la forma de cristalización, la dureza, la forma de su fractura y disposición de sus planos cruceros, la tenacidad, la capacidad para permitir el paso de ondas y radiaciones (luz) y la densidad relativa.

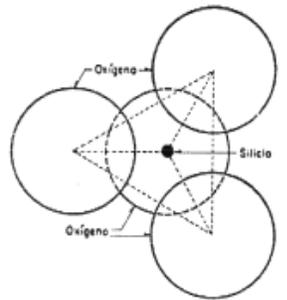
Para los fines del presente estudio, suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie.

Es bien conocido que la corteza terrestre se compone principalmente por silicatos, en los suelos formados por partículas gruesas, los predominantes son principalmente feldespatos (de potasio, sodio o calcio), micas, olivino, serpentina, etc.; óxidos, cuyos principales exponentes son el cuarzo, la limonita, la magnesita y el corindón; carbonatos, entre los que destacan la calcita y la dolomita y sulfatos, cuyos principales representantes son la anhidrita y el yeso.

En los suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente condicionado por su compacidad y por la orientación de sus partículas, por lo que la constitución mineralógica es, hasta cierto punto, secundaria.

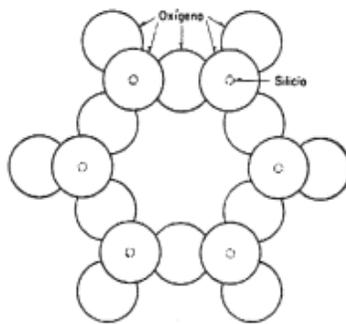
Por su parte las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica.

La primera, de tales láminas, está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, disponiéndose el conjunto en forma de tetraedro, tal como se muestra en la Figura 1.1. Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexos entre cada dos tetraedros.



**Figura 1.1 Esquema de la estructura de la lámina silícica**

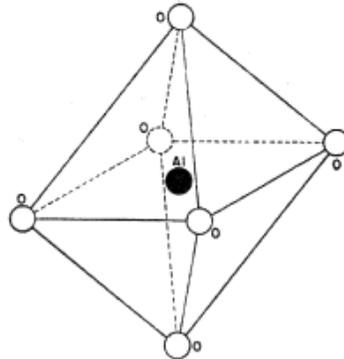
Un esquema de una unidad hexagonal aparece en la Figura 1.2. Las unidades hexagonales repitiéndose indefinidamente, constituyen una redícula laminar.



**Figura 1.2 Esquema de una unidad hexagonal de una lámina silícica**

Las láminas aluminicas están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, tal como aparece en la Figura 1.3. También ahora es el oxígeno el nexo entre cada dos octaedros vecinos, para constituir la retícula.

De acuerdo con su estructura, los minerales de arcilla se clasifican en tres grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas. Las caolinitas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) están formadas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción). En consecuencia, las arcillas caolínificas son relativamente estables en presencia de agua.



**Figura 1.3 Esquema de la estructura de la lámina alumínica**

Las montmorilonitas  $((OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O)$  están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior, produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce en expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, con frecuencia en los trabajos de campo.

Las illitas  $((OH)_4K_y(Si_{8-y}Al_y)(Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)O_{20})$ , con  $y$ , por lo general, igual a 1.5) están estructuradas análogamente que las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ello, su potencial de expansión es menor que el de las montmorilonitas y su comportamiento mecánico es más favorable para el ingeniero.

Para entender mejor la respuesta de los suelos finos a la estabilización es importante conocer los aspectos físico-químicos de estos. En general, se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores y presentan una actividad eléctrica importante, que rige su comportamiento dada su gran superficie específica en relación con su volumen y aún su masa.

Una de las teorías más aceptadas, hasta ahora desarrolladas, para explicar la estructura interna de las arcillas es la que menciona que la superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La intensidad de la carga

depende de la estructuración y composición de la arcilla. La partícula atrae a los iones positivos del agua ( $H^+$ ) y a cationes de diferentes elementos químicos, tales como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$ , etc, se tiene entonces, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida).

Las moléculas de agua son polarizadas, es decir, en ellas no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes; al ligarse a la partícula por su carga (+), el polo de carga (-) queda en posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen moléculas de agua gracias a la naturaleza polarizada de éstas, de modo que cada catión está en posibilidad de poseer un volumen de agua en torno a él. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de éste y con su radio iónico (Peck, R.B., Hanson, W.E. y Thornburn, T.H. 1957).

Por lo anterior, cuando las partículas del suelo atraen a los cationes, se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de suelo es así función, no solo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes absorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrógena (con cationes  $H^+$ ) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. En realidad lo que ocurre es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces en reacción rápida. Los cationes intercambiables más usuales son  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$  y  $(NH_4)^+$ .

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las montmorilonitas y las ilitas poseen la propiedad en grado intermedio. La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hace notable, en general, para valores del pH menores que 7. La capacidad de intercambio también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule por la masa de suelo.

Las propiedades mecánicas de una arcilla pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden distintos espesores de la película adsorbida, lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo.

## 2 Estabilización de suelos

---

### 2.1 Clasificación de suelos con fines de estabilización

Existen varios sistemas para clasificar a los suelos con fines de estabilización, uno de los más conocidos es el que se basa en el tamaño, forma y arreglo de las partículas y conocido como sistema Northcote, en donde se divide al suelo en los grupos fundamentales siguientes:

Descripción	Símbolo
Suelos con perfil de textura uniforme	U
Suelos con perfil de textura gradual	G
Suelos con perfil de textura doble	D
Suelos orgánicos	O

Entendiéndose el concepto de textura desde el punto de vista científico geotécnico, a la forma en que están agregadas las partículas de arena, limo y arcilla. Además la descripción de textura se compone de tres partes: forma, tamaño y grado de desarrollo.

Asimismo se subdivide a estos suelos en subgrupos de acuerdo con algunas características visibles tales como el color, presencia de concreciones, rellenos en las grietas o fisuras, etc., así como algunas características no detectables a simple vista como lo es la alcalinidad o acidez. Cabe mencionar que esta clasificación no ha sido aceptada en forma universal, aunque actualmente se están haciendo algunos esfuerzos para que sea aceptada.

Resulta razonable pensar que mientras mejor se conozcan las características físicas y químicas de un suelo mejor se puede emprender el estudio de la estabilización.

#### **Parámetros esenciales en el reconocimiento de suelos, según el sistema Northcote**

El primer paso para la determinación de la composición y propiedades esperadas en un suelo, es el reconocimiento visual y manual, el segundo paso importante es la determinación del tipo de minerales que contiene el suelo, pues de ellos depende en forma directa la estabilidad volumétrica, la cohesión y, en especial la

reactividad a la estabilización. La determinación del tipo de mineral, cuando de estabilizaciones se trata, es una herramienta de gran utilidad. Los tipos de minerales se pueden determinar con microscopios electrónicos, difracción de rayos x, espectrometría con rayos infrarrojos y análisis químicos. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos y para fines prácticos puede inferirse el tipo de minerales mediante observaciones de campo sencillas.

De los cientos de minerales que se han encontrado en los limos y arcillas contenidos en un suelo, basta para fines prácticos e ingenieriles, el reconocimiento de la existencia de menos de diez de ellos. Algunas características principales de estos se muestran en la Tabla 2.1. (Ingles O. G., Metcalf. 1972).

**Tabla 2.1 Principales tipos de minerales**

<b>Grupo</b>	<b>Minerales</b>	<b>Tamaño promedio</b>	<b>Características físicas principales</b>
Arena muy fina	Cuarzo	> 1 $\mu$	Abrasiva, sin cohesión.
Mica	Muscovita, biotita	> $\mu$	Sin cohesión, se intemperiza fácilmente, compactable.
Carbonato	Calcita, dolomita	Variable	Se pulveriza fácilmente.
Sulfato	Yeso	> 1 $\mu$	Ataca al cemento
Alófono	Aluminosilicatos Amorfos, atapulgita, Alúmina y sílica hi- dratadas.	$\approx$ 1 $\mu$	Alta relación de vacíos, alta plasticidad.
Caolín	Caolinita y halloysita.	$\approx$ 1 $\mu$	No expansivo, baja plasticidad, baja cohesión.
Ilita	Ilita y micas par- cialmente degradadas.	$\approx$ 0.1 $\mu$	Expansiva, plasticidad media, baja permeabilidad.
Montmorilonita	Montmorilonita y Bentonita.	$\leq$ 0.01 $\mu$	Altamente expansiva, muy plástica, permeabilidad extremadamente baja.
Clorita	Clorita, vermiculita	$\approx$ 0.1 $\mu$	Expansión baja, resistencia al cortante baja.
Materia orgánica	Presencia de ácido	Variable	Alta permeabilidad, difícilmente compactable, se puede degradar Rápidamente por oxidación.

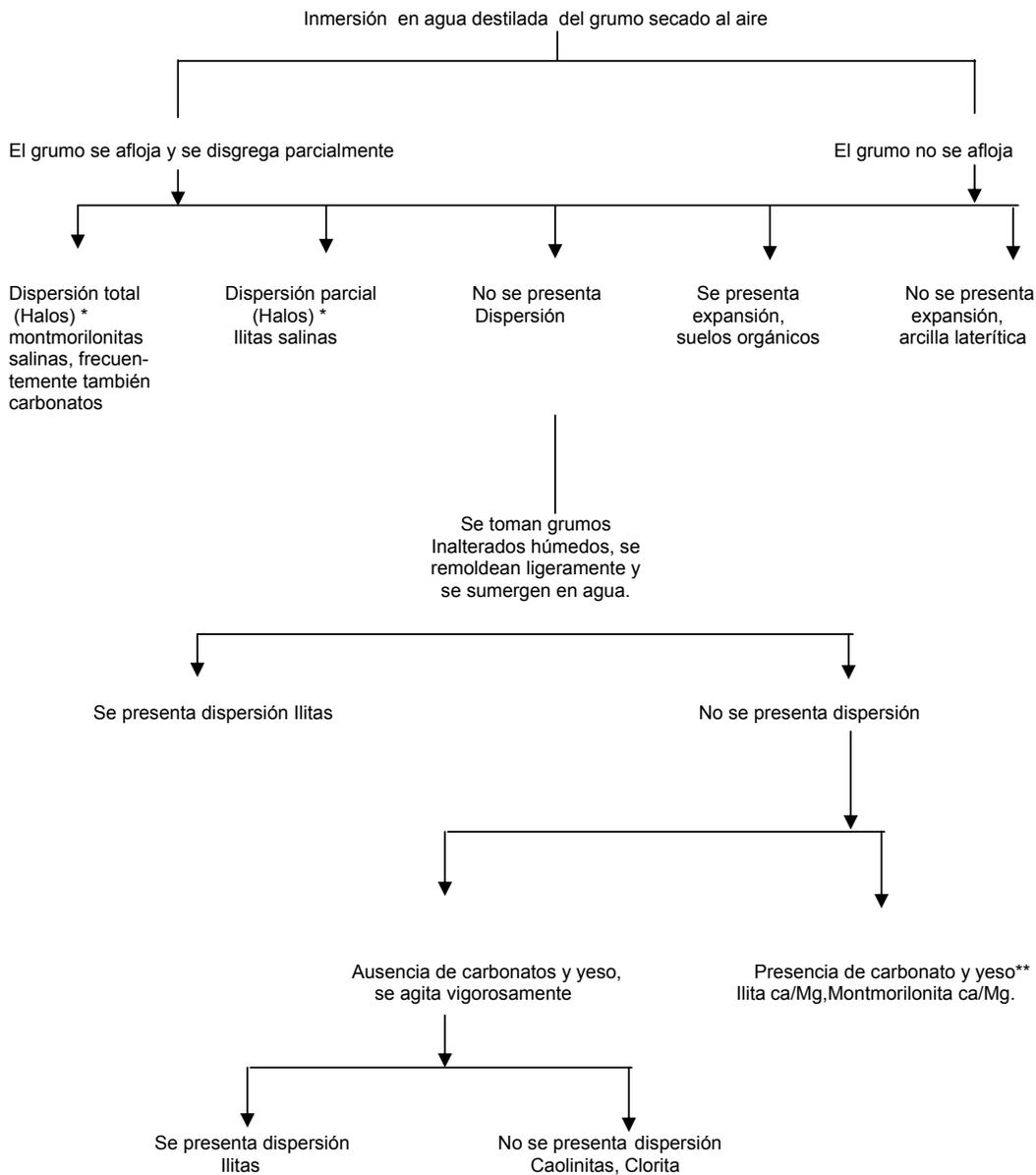
### **Identificación de los minerales de un suelo, según el sistema Northcote**

Se puede reconocer con cierto grado de aproximación a la mayoría de los grupos minerales con base en observaciones y pruebas sencillas de campo. El método Norcothe se basa en tres premisas que son las siguientes:

- a) Observaciones generales del lugar y del perfil de suelos. Es necesario efectuar pozos a cielo abierto o extraer muestras inalteradas. Es de utilidad el análisis de cortes existentes en la región o extraer muestras alteradas, en donde se toma nota de los colores del suelo y del agua en los encharcamientos cercanos.
- b) Apreciación de la textura del suelo. La textura del suelo puede estimarse con la ayuda de agua de lluvia o destilada.
- c) Inmersión del espécimen del suelo, completamente en agua de lluvia o destilada. El procedimiento que se recomienda se le ha designado como "prueba del grumo". No se deben agregar agentes dispersantes, ni humedecedores. El procedimiento consiste en colocar un pequeño grumo de suelo secado al aire (aproximadamente del tamaño de un frijol) dentro de un vaso de vidrio claro lleno de agua destilada o de lluvia. Es muy importante que no se altere el grumo en ninguna forma, salvo el secado, antes de su inmersión en agua. Se observa el comportamiento del grumo, después de la inmersión, durante un lapso de hasta 10 minutos, tomando en cuenta el esquema de la Figura 2.1.

Deben anotarse todas las observaciones de campo en forma apropiada así como su localización precisa; los datos que tradicionalmente se registran son los siguientes:

- Profundidad a partir de la superficie.
- Color. Cuando se presenten motas, anotar sus coloraciones.
- Inclusiones. Indicar si se trata de carbonatos, hierro, raíces, materia orgánica.
- Textura y consistencia.
- Dispersión en agua.
- Tipo de perfil.
- Geología. Tipo de rocas o formaciones en la región.
- Aguas superficiales. Coloración, turbidez, etc.
- Erosión. Tipo de erosión.
- Presencia de deslizamientos.
- Micro relieve en los suelos.
- Mineral Inferido.



\* La dispersión se detecta mediante la formación de halos, alrededor de cada grumo, fácilmente visibles contra un fondo oscuro, mientras más pronunciados sean los halos, más alta será la dispersión. El asentamiento del suelo en el líquido que permanece claro durante menos de 10 minutos será un signo de la ausencia de dispersión.

\*\* Si no se reconoce fácilmente la presencia de carbonatos, esta se puede verificar mediante la efervescencia del suelo al colocar una gota de ácido en éste. El ácido de una batería puede ser suficiente.

**Figura 2.1 Esquema de la prueba de inmersión del grumo en agua.  
Principales tipos de minerales**

La finalidad de reconocer a los suelos tanto visual como manualmente es permitir tomar decisiones lógicas respecto al tipo de estabilización más adecuado así como las pruebas a efectuar. De esta manera se pueden lograr economías considerables sin riesgos para el proyectista de la estabilización. Para lograr que el reconocimiento de los suelos sea más efectivo debe complementarse con el conocimiento de las propiedades del suelo y de sus componentes. Con este fin, en la Tabla 2.2 se indican las propiedades ingenieriles de los diferentes componentes de un suelo, tomando en cuenta que estas tablas son generales y que pueden presentarse excepciones.

**Tabla 2.2 Propiedades ingenieriles de los componentes de un suelo (Ingles O. G., Metcalf. 1972)**

Componente	ARENA	LIMO	MICA	CARBONATO	SULFATO	CAOLIN	ILITA	MONTMORI LONITA	CLORITA	ALOFANO	MATERIA ORGANICA
Permeabilidad Seco Húmedo	++ ++	- +	m +	≡ ≡	≡ ≡	- -	- -	- -	- -	m ++	++ ++
Estabilidad Volumétrica	++	++	++	++	++	+	-	--	-	m	+
Plasticidad Cohesión	+ -	--	-	-	-	m	+	++	M	++	m
Resistencia Seco Húmedo		+ -	+ m	+ +	+ m	m -	+ m	++ --	m -	m -	- --
Compactación Con la humedad óptima.	+	m	--	++	+	-	m	--	m	++	--
Estabilidad al intemperismo	++	+	--	++	-	+	m	+	m	-	--
Abrasividad	++	m	-	-	m	-	--	--	-	-	-
	PROBLEMA S CUANDO EL MATERIAL ES UNIFORME		LA BIOTITA CAUSA MÁS PROBLEMA S QUE LA MUSCOVITA	SOLUBLE EN ACIDOS	ATACA A LOS CEMENTOS PORTLAND		TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD	TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD	TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD		

m = Moderado  
+ = Alto  
++ = Muy alto

- = bajo  
-- = Muy bajo

## 2.2 Productos empleados en la estabilización de los suelos

En el diseño de la estabilización de un suelo se deben tener presentes las variaciones que se espera lograr en lo que se respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y compresibilidad.

El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes, consiste en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con la cual se determina el tipo y cantidad de agente estabilizante así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño obviamente depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado.

En la Tabla 2.3 se presenta la respuesta de los principales tipos de suelos a la estabilización con diversos aditivos.

**Tabla 2.3 Respuesta a la estabilización de los principales tipos de suelos (Fernández L. C. 1982)**

Componente dominante	Estabilizante recomendado	Objetivos
Arenas	Arcilla de baja plasticidad	Para estabilización mecánica
	Cemento Pórtland	Incrementar el peso volumétrico y la cohesión
	Asfaltos	Incrementar la cohesión
Limos	Dependerá del tipo de minerales que contenga.	-----
Alófanos	Cal	Acción puzolánica e incremento en el peso volumétrico
Caolín	Arena	Para estabilización mecánica
	Cemento	Para resistencias tempranas
	Cal	Trabajabilidad y resistencia tardía
Iilita	Cemento	Igual que el caolín
	Cal	Igual que el caolín
Montmorilonita	Cal	Trabajabilidad y resistencia reducción de expansiones y contracciones

En lo que sigue se presenta, en forma muy breve, lo más importante sobre el uso de algunos aditivos empleados para la estabilización de suelos.

### **2.3 Estabilización con productos químicos**

En la actualidad se ha aplicado un gran número de productos químicos con este fin, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios. Aunque es poco común, la estabilización con productos ácidos está adquiriendo en la actualidad bastante difusión y experimentación. De los ácidos que han demostrado ser efectivos para modificar favorablemente algunos suelos, algunos son económicamente competitivos contra otros productos más comunes; sin embargo, como en el caso de los otros productos hasta aquí mencionados, se debe contar con la asesoría de especialistas en la materia, tanto durante la etapa de diseño como de construcción de la estabilización, pues en este caso se involucran peligros tanto para las personas como para los equipos.

### **2.4 Estabilización con sales**

Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H<sup>+</sup>) ni básicos de hidróxilo (OH<sup>-</sup>). Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas.

En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, BaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

### **2.5 Estabilización con cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>)**

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

La solubilidad del cloruro de calcio es de 60 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 0° C, o de 159 g aproximadamente, por cada 100 c.c. de agua destilada a 100° C.

Se ha demostrado que con la adición de cloruro de calcio disminuyen las fuerzas de repulsión entre las arcillas, pero hay autores que inclusive aseguran que la película de agua que rodea a las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición del cloruro de calcio, a tal grado que se incrementa notablemente la cohesión aparente. Como en el intercambio catiónico se sustituye un ión  $\text{Ca}^{++}$  por 2 iones  $\text{Na}^+$ , la doble capa se ve reducida en su espesor lo que hace que se reduzca el potencial eléctrico y en consecuencia se reduzcan las fuerzas de repulsión entre las partículas.

Se ha encontrado un incremento en los pesos volumétricos hasta en un 11% con la adición de 0.5 a 3% de cloruro de calcio, según el tipo de suelo. Sin embargo, existen datos que reportan disminuciones en el peso volumétrico con respecto a un suelo arcilloso que no contenga el cloruro de calcio.

Así también se tiene que el cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo pero desafortunadamente esta sal es muy fácilmente lavable. Se reduce la evaporación y es capaz de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose mantener dicha humedad en sus dos terceras partes durante un día de calor seco, lo que hace de esta sal un producto muy eficaz cuando se trata de evitar la formación de polvo en terracerías, lo que acepta el Cuerpo de Ingenieros para el caso de caminos con tránsito muy ligero.

Se tiene sin embargo que existen limitaciones para el empleo del cloruro de calcio, entre las más importantes se tienen:

- Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.
- Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.
- Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

### **Estabilización de suelos con silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )**

El silicato de sodio pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. Se le ha empleado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante, catalizador, etc., en solución es

incolore e inodoro y actúa en términos generales, como un jabón fuerte, y causa serios daños a los ojos si se llega a introducir en ellos.

La estabilización de suelos con silicato de sodio para su empleo en carreteras, se ha empleado en el mundo desde 1945, aproximadamente, y parece ser que los mejores resultados se han obtenido en el caso de suelos arenosos y climas moderados.

Varios investigadores han reportado desde 1945, la efectividad del silicato de sodio como estabilizante de suelos; en algunas ocasiones se le empleó solo y otras veces junto con otros productos químicos. Sin embargo, parece ser, que los éxitos logrados fueron para el caso de suelos arenosos y en climas moderados si se emplea nada más el silicato de sodio, ya que para otros tipos de suelo se requiere el empleo de otros productos químicos adicionales.

Lo que si se ha podido aseverar, es que el silicato de sodio se puede utilizar para trabajos de estabilización de suelos cuando se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnífico agente cementante. El efecto de la adición de un silicato, a cierto tipo de suelos, ha sido el de incrementar la permanencia del agua de compactación, aumentar la resistencia al disgregado, abatir el índice plástico y la expansión. Algunas evidencias indican que en la reacción del silicato de sodio con el suelo se presenta un intercambio aniónico, dando como resultado la formación de corazas de silicatos insolubles alrededor de las partículas de suelo, aunado a la acción cementante entre las partículas de suelo y el estabilizante.

Mediante un estudio exhaustivo, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts se encontró que otros tipos de sales diferentes a los ya referidos, tales como el sulfato de cobre, sulfato de bario, sulfato de aluminio, sulfato de magnesio, etc., no producen cambios significativos a los suelos, o bien la mejoría resulta muy pequeña y su costo elevado como para justificar la aplicación de dichas sales.

### **Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)**

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el método más reciente consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza (la ASTM y la AASHTO han fijado especificaciones al respecto).

Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de ésta última. Se han reportado casos en los que el empleo de 2 a 3% de sal abatió el punto de congelamiento de un suelo hasta 2° C.

Las soluciones que contengan cloruro de sodio (NaCl) disuelto, presentan una mayor tensión superficial que en el caso del agua destilada y en 1% de sal incrementa la tensión superficial en 1 a 2 dinas por cm<sup>2</sup>, asimismo, la adición de sal al agua abate la presión de vapor.

Los cambios en el agua, debidos a la adición de sal, tanto en el punto de congelación como en la tensión superficial y la presión de vapor, dependen de la solubilidad de la sal. Ahora bien, la sal se adiciona al agua en pequeños porcentajes, ésta se disuelve rápidamente pero a medida que el porcentaje adicionado va siendo más elevado, la sal se disuelve con más dificultad y se tendrá un cierto porcentaje más allá del cual la sal ya no se disuelve.

Existe en la superficie de las partículas arcillosas una doble capa de iones adsorbidos, en la cual la energía potencial existente se disipa a partir de dicha superficie, hasta que a una cierta distancia se tenga el mismo potencial que el líquido circundante. La magnitud de este potencial se puede expresar por una cantidad asignada como:

$$z = \frac{4Qd}{AK}$$

En donde:

- Q es la carga eléctrica
- d es el espesor de la doble capa
- A es el área superficial
- K es la constante dieléctrica

De los parámetros anteriores, el único que se puede modificar es el espesor de la doble capa, lo cual se logra incrementando la concentración de electrolito en el agua de mezclado y sustituyendo iones de valencia alta por iones de valencia menor. Al sustituir iones de valencia superior por iones de valencia menor en la superficie de una partícula de arcilla se tendrán entonces, menos iones susceptibles a crecer debido a que están rodeados por moléculas de agua sobre dicha superficie y en consecuencia se reduce el espesor de la doble capa.

Cuando las partículas se encuentran rodeadas por cargas del mismo signo se repelen; pero si alguna de las partículas o parte de ellas tiene carga opuesta entonces se desarrollan fuerzas de atracción. Se ha observado que si el medio que rodea a estas partículas es con un bajo pH, entonces los bordes de las partículas tienden a cargarse en forma positiva, en cuanto a las caras estas permanecen con carga negativa, por lo que resulta una floculación de las caras de unas partículas con los bordes de las otras. En tanto que si se tiene un alto pH, tanto los bordes como las caras tienden a quedar con cargas negativas y la estructura puede quedar en forma dispersa.

En las partículas arcillosas el tipo de intercambio importante es el catiónico es decir, intercambio de iones positivos, debido a que las superficies de las partículas están cargadas negativamente.

En lo que respecta a la estabilización de suelos con Cloruro de Sodio se ha discutido mucho en lo concerniente al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de esta sal, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que si parece existir un común acuerdo, es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima. Se admite teóricamente que el cloruro de sodio ocasiona que la arcilla se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, pero en la práctica este criterio no se ha verificado en todos los casos, por lo que no se debe generalizar.

Al agregar la sal se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones.

En el caso del empleo del cloruro de sodio se han tenido en México aplicaciones exitosas, como en las terracerías de las salinas de Guerrero Negro, California, en donde éstas están constituidas por arenas de mar compactadas con agua de mar y cuya condición salina se mantiene siempre constante, pero existen otras experiencias como las de las aeropistas de Loreto e Islas Marías, cuyas bases fueron compactadas con agua de mar y los tratamientos superficiales posteriormente colocados, se han desprendido formando ámpulas que se destruyen fácilmente por los efectos abrasivos de las llantas.

De lo anterior se deduce que es de suma importancia tener conocimiento de la reacción íntima entre la sal y el suelo, así como la permanencia a través del tiempo de la estabilización lograda y sus efectos colaterales que causaría, en algunos elementos de la estructura del camino.

Se tiene que se ha logrado mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Según lo manifiestan algunos investigadores, la adición de sal en una arcilla produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal y estos cambios físicos, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas y cuando estas se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en plantas con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos.

Si se desea utilizar el equipo tradicional, los pasos a seguir son:

- Escarificación
- Disgregación
- Adición de cloruro de sodio
- Adición del agua
- Mezclado con motoconformadora
- Tendido y compactación

Cuando el mezclado se hace en planta ha sido práctica común adicionar la sal en forma de solución y cuando se intente la estabilización con sal deberán tenerse presentes las siguientes limitaciones:

- El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
- Se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal.
- La materia orgánica inhibe la acción de la sal.
- El rodillo pata de cabra no ha dado buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.
- Es indispensable la intervención de un técnico especializado en todo estudio de estabilización con sal, incluyendo las pruebas correspondientes.

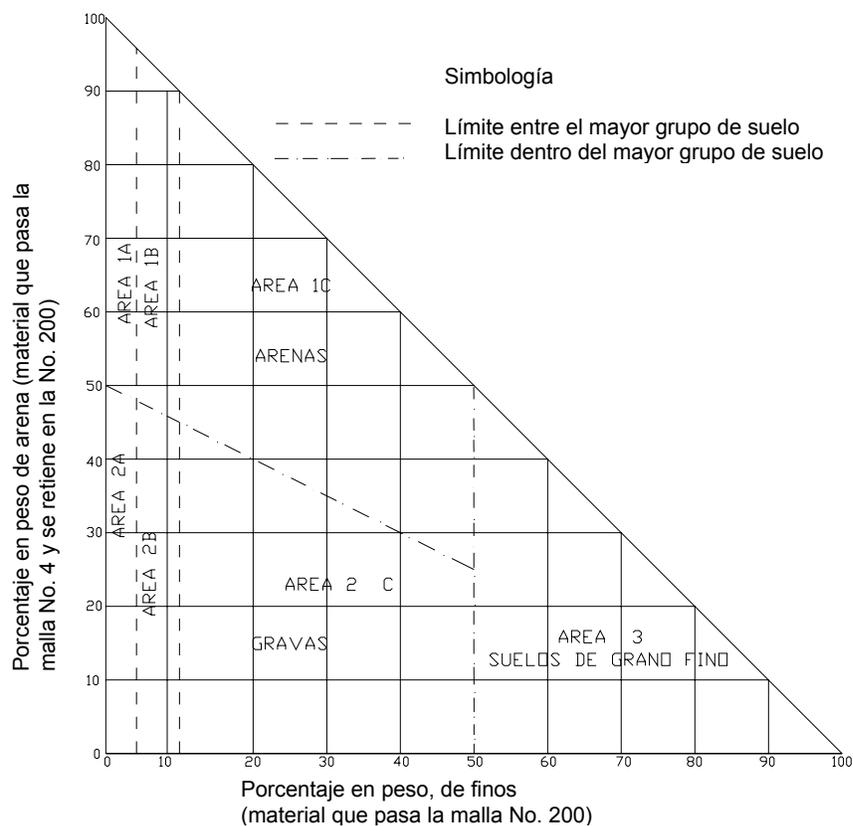
## **2.6 Algunos criterios para la estabilización de suelos para pavimentos**

Dentro de los criterios para la estabilización de suelos se encuentran los usados por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norte América para estabilizar suelos. De los factores que se consideran en la selección del estabilizante, el más importante es el tipo de suelo que se va a estabilizar. Para el cual hay más de un estabilizante que se puede aplicar con éxito, la Fuerza Aérea, utiliza guías o líneas basados sobre todo en la granulometría, plasticidad y textura del suelo.

La selección de estabilizantes se hace usando la Figura 2.2 y la Tabla 2.4 El triángulo de la granulometría del suelo en la Figura 2.2 está basada en las características de la granulometría de los suelos y en las características de pulverización. El proceso de selección del estabilizante se continúa con la Tabla 2.4 como indica para cada área mostrada en la Figura 2.2.

Las restricciones se basan en la granulometría y en el índice de plasticidad, (IP) se usa la segunda columna de la Tabla 2.4; en ésta, se enlistan los símbolos para la clasificación de suelos que se aplica para cada área determinada por la Figura 2.2. Esto se hace para verificar que el área seleccionada es la apropiada.

Debido a ello, la distribución granulométrica y los límites de Atterberg son usados para iniciar el proceso de selección. Los datos que se requieren para entrar a la Figura 2.2 son: porcentaje de material que pasa la malla No. 200 y el porcentaje de material que pasa la malla No. 4 pero que se retiene en la No. 200. Al triángulo se entra con estos dos valores y en donde se intercepten esa es el área (1A, 2A, 3, etc.)



**Figura 2.2 Triángulo de graduación para seleccionar el agente estabilizante.**

El área determinada por la Figura 2.2 y el suelo clasificado se encuentra en la segunda columna. El posible suelo por estabilizar en cada área se encuentra en la tercera columna y las restricciones para el uso del agente estabilizante considerado no se aplican para el tipo de suelo en particular. Por ejemplo, se asume que un suelo clasificado como SC, con 93% que pasa la malla No.4 y 25% que pasa la malla No.200, con un límite líquido de 20 y límite plástico de 11. Se tiene que el 68% del material está entre la malla No.4 y la malla No. 200 y el índice plástico es 9. Entrando a la Figura 2.2 en los valores de 25% que pasa la malla No.200 y 68% entre la No.4 y No.200, la intersección de estos valores se encuentra en el área 1C. Con esto se va a la columna de la Tabla 2.4 y se encuentra el área 1-C y se verifica la clasificación del suelo, SC, en la segunda columna. En la tercera columna se encuentran los 4 potenciales materiales estabilizantes. Las restricciones que se siguen en las otras columnas no se utilizan aquí.

Los estabilizantes asfálticos se utilizan siempre y cuando el índice plástico no exceda de 10 y la cantidad de material que pasa la malla No.200 no exceda del 30%. Sin embargo se debe hacer notar que el suelo que solo se ha clasificado bajo este criterio probablemente la estabilización con bituminosos no sea la primera opción. Las restricciones aplicadas al cemento Pórtland indican que el Índice Plástico debe estar por debajo de la ecuación indicada en la nota de pie. Desde el Índice Plástico, que es bajo para valores del Cemento Pórtland podrá ser un material probable a utilizar. Las restricciones aplicadas a la cal indican que el índice Plástico no será menor de 12.0 así la cal no es un buen material para ser empleado para estabilización.

El diseño para seleccionar el material final está basado en otros factores como la disponibilidad de los materiales, economía, etc. Algunos de los agentes estabilizantes son empleados para determinar muestras y testigos en el laboratorio para desarrollar el diseño de la mezcla empleando un mínimo de criterios ingenieriles en el campo de la estabilización.

En el diseño de la estabilización de un suelo, se toma en cuenta al producto más adecuado, plantea a la fecha un problema que para su solución requiere del estudio de las posibles reacciones y generación de nuevas formaciones minerales que tomarán lugar en el proceso de estabilización.

El diseño de estabilizaciones, empleado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos menciona que no se deben ignorar la naturaleza de los tipos de minerales que contenga el suelo a estabilizar, ya que el no hacerlo trae como consecuencia serios fracasos.

Tabla 2.4 Selección del aditivo estabilizante.

Área	Clase de suelo	Tipo de estabilizante aditivo recomendado	Restricción en el límite líquido e índice plástico del suelo	Restricción para el porcentaje que pasa la malla No.200	Observaciones
1A	SW SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal-cemento-ceniza volátil.	Índice Plástico < 25		
1B	SW-SM SP-SM SW-SC SP-SC	(1) Asfálticos (2) Cemento Portland (3) Cal Cal-cemento-Ceniza volátil.	Índice Plástico < 10 Índice Plástico < 30 Índice Plástico < 12 Índice Plástico < 25		
1C	SM SC SM-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal Cal-cemento-ceniza Volátil	Índice Plástico < 10 --b Índice Plástico < 12 Índice Plástico < 25	No exceda en 30% en peso	
2A	GW GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal-cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico < 25		Solamente Material bien graduado y material que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla No.4.
2B	GW-GM GP-GM GW-GC GP-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-cemento-Ceniza-volátil.	Índice Plástico < 10 Índice Plástico < 30 Índice Plástico < 12 Índice Plástico < 25		Solamente material bien graduado y material que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla No.4
2C	GM GC GM-GC	(1) Asfálticos (2) Cemento Pórtland (3) Cal (4) Cal-cemento-Ceniza volátil	Índice Plástico < 10 --b Índice Plástico < 12 Índice Plástico < 25	No exceda en 30% En peso	Solamente material bien Graduado Material que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla No.4
3	CH CL MH ML OH OL ML-CL	(1) Portland (2) Cal	Límite Líquido < 40 e Índice Plástico < 20 Índice Plástico > 12		

En el procedimiento referido en este inciso no se toma muy en cuenta a la reactividad de los aditivos con los agregados, por lo que dicho procedimiento deberá tomarse con las debidas precauciones y limitaciones.

Conviene tener presente, que por sus propias funciones, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos ha construido tanto pavimentos de funcionamiento temporal (por ejemplo en zonas de combates) ó bien de funcionamiento permanente (por ejemplo las pistas de despegue de sus aeropuertos en Estados Unidos), por lo que han considerado a estos dos casos en su sistema de diseño.

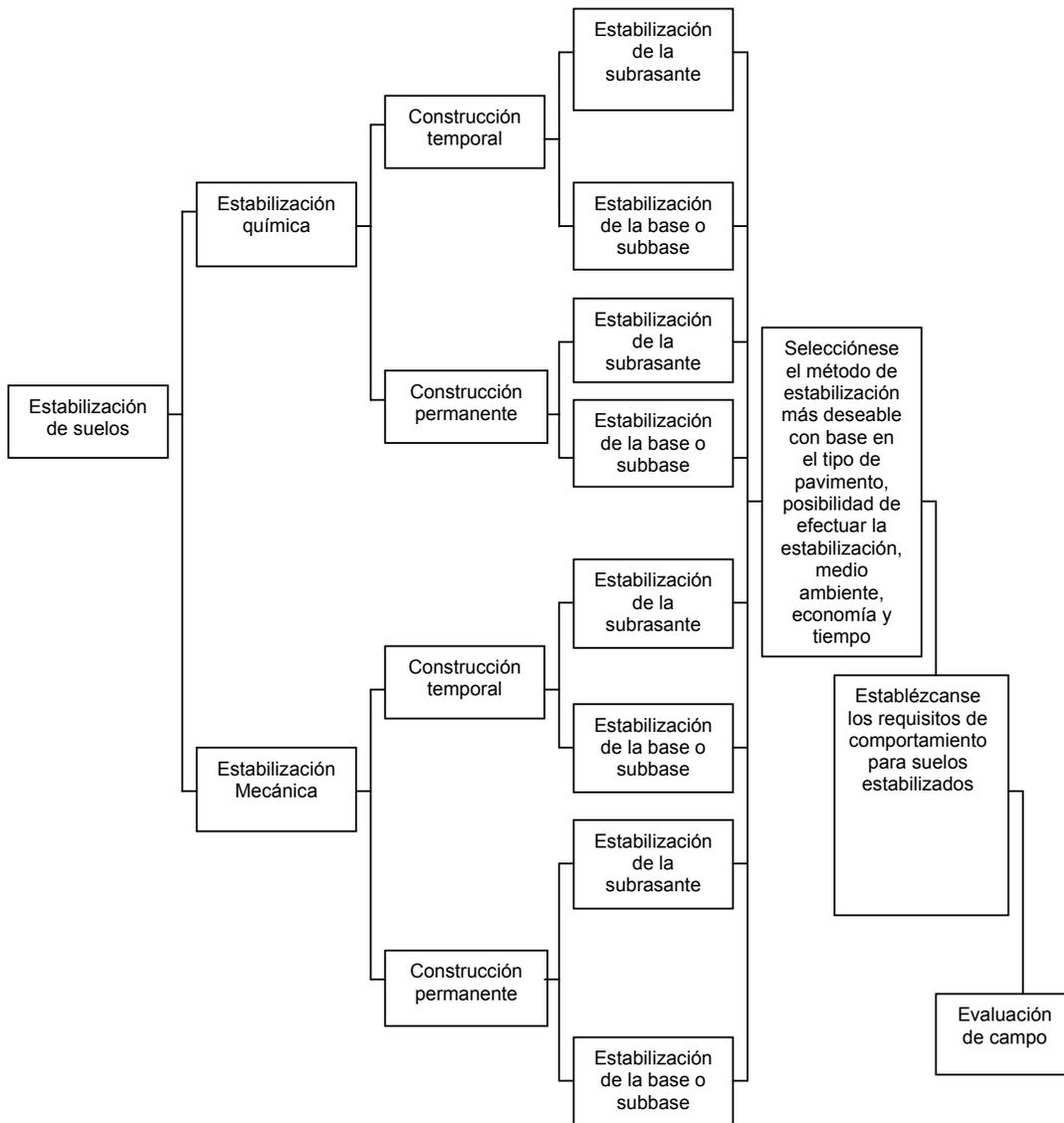
La Figura 2.3 muestra en forma esquemática el enfoque global sistemático del diseño y se puede notar que no solamente se contempla el caso de la estabilización química, aunque si reviste interés primario, sino que también se admite como alternativa a la estabilización mecánica, entre otras, la compactación y la preconsolidación.

Una vez que se ha decidido, con base en factores de orden práctico o económico, el tipo de estabilización a realizar, habrá que decidir cual es la capa más conveniente a tratar de acuerdo con la disponibilidad de los materiales, su calidad y costo.

La siguiente etapa sería la elección del método de estabilización más adecuado. El tipo de pavimento regirá como un primer punto a esta elección pues en unos casos la resistencia puede ser la que revista mayor importancia (base de pavimentos flexibles, por ejemplo), mientras que en otros lo puede ser la adherencia o unión de las partículas (caso de subbases de pavimentos rígidos para evitar el bombeo), o inclusive la permeabilidad.

Los factores ambientales pueden influenciar a la resistencia última del suelo estabilizado, tanto como la calidad de los materiales a emplear en la estabilización; una cantidad excesiva de lluvia puede alterar la efectividad de una estabilización pues podría por ejemplo lavar y percolar la sal adicionada a un suelo, o bien la existencia de aguas ácidas puede anular los efectos estabilizantes de un aditivo alcalino al quedar ambos en contacto.

Por otro lado, la temperatura ejerce también influencia en la velocidad de las reacciones químicas, razón por la cual debe tomarse en cuenta al elegir los métodos de estabilización en ciertas épocas del año. El perfecto conocimiento del funcionamiento y limitaciones del equipo disponibles es de suma importancia, pues esto permitirá que el ingeniero pueda, a priori, eliminar ciertos productos que no resulten de aplicación práctica; pues, por ejemplo, no sería de esperar un buen trabajo de estabilización si se requiere mezclar una arcilla plástica muy húmeda con cemento Pórtland si para ello se cuenta solamente con arados de disco y motoconformadoras, ya que en este caso sería indispensable contar con sistemas de secado y pulverización.



**Figura 2.3 Sistema índice de clasificación para estabilización de suelos propuesto por la Fuerza Aérea**

Una vez seleccionado el método de estabilización deberán establecerse las premisas de comportamiento con las que el suelo deberá cumplir, dependiendo de las propiedades que se desee obtener en el suelo estabilizado, pues se pueden tener casos en los que se requiera evitar la aparición de canalizaciones por fallas plásticas, o bien evitar el desarrollo de cambios volumétricos por cambios de humedad o el aumento en la resistencia al desgaste, etc.

Finalmente deberán efectuarse evaluaciones periódicas para verificar el funcionamiento de la estabilización y lo que es más, la aplicabilidad del método de diseño que se está exponiendo.

## **2.7 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio**

Pocos son los trabajos publicados que presentan en detalle el comportamiento esfuerzo-deformación de suelos estabilizados con cloruro de sodio.

Existen varios autores que han estudiado el efecto del cloruro de sodio en las propiedades de los suelos, principalmente en las propiedades físicas y entre las principales observaciones podemos citar las siguientes:

- a. El peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión se incrementan al adicionar cloruro de sodio hasta en un 3%.

El límite líquido y el índice plástico se reducen al adicionar cloruro de sodio (Ogawa et al,1963).

- b. La cohesión y el ángulo de fricción interna parecen disminuir al adicionar cloruro de sodio y en especímenes en los que no se permita la pérdida de humedad. Parece que si se permite el secado antes de ensayar los especímenes tanto la cohesión como el ángulo de fricción aumentan de manera importante (Ogura & Uto, 1963).
- c. Las partículas de roca caliza parecen ser solubles a soluciones de cloruro de sodio (Wood,1969).
- d. La capacidad de retención de humedad aumenta en los suelos tratados con cloruro de sodio (Marks et al 1970).

A partir de la revisión en la literatura se parece evidenciar, en todo caso, que existen suelos que al parecer no responden a la estabilización con cloruro de sodio.

En su trabajo doctoral El-Sekelly, 1987, estudio tres mezclas de suelo. En todos ellos observó mejoras de los valores de resistencia a la compresión, a la tensión, de valor relativo de soporte e incluso en los valores de módulo de resiliencia. Cabe mencionar, sin embargo, que en varios casos agregó un 2% de cal además del cloruro de sodio.

Adicionalmente, es de llamar la atención en el trabajo de El-Sekelly, el hecho de que dos de las mezclas de suelo que estudio eran suelos gruesos, con clasificaciones SC y GC según el SUCS.

El otro suelo estudiado por El-Sekelly se clasifica como MH, con un límite líquido de 54% y un índice plástico del 38%. y el porcentaje de arcilla es del 28%, con una gran proporción de limo y arena.

También en el trabajo de G. Singh y B. Das,1999, se presentan mejoras en las propiedades de resistencia y módulo de resiliencia en los suelos estudiados que son los mismos que investigó El-Sekelly.

Llama la atención el hecho de que en esos trabajos, las mejoras de comportamiento que se presentan se lograron cuando los especímenes de suelo tuvieron un secado previo a la ejecución de los ensayos correspondientes.

Lo anterior es muy importante ya que no hay manera de diferenciar si esa aparente mejora de propiedades se logró porque disminuyó el contenido de agua del espécimen o por una real contribución del cloruro de sodio.



## 3 Diseño del experimento

---

En este capítulo se describen los materiales en estudio, así como las propiedades índice de éstos. También se mencionan los ensayos realizados a los materiales, y el proceso que se siguió en la realización de los especímenes.

### 3.1 Características de los materiales estudiados

A continuación se describirán las características de los materiales objeto de nuestro estudio.

#### Características de los Suelos

Los materiales que se analizaron se obtuvieron de muestreos alterados, los cuales se realizaron uno en el Salitre y el otro en Jurica, ambos en el Estado de Querétaro. La razón por la que se escogieron estos suelos, es básicamente el antecedente de expansividad que han presentado.

El primer suelo presenta las siguientes características:

Localización:	<i>El Salitre, Qro.</i>
Profundidad de la muestra:	<i>1.80 m</i>
Descripción de la muestra:	<i>Arcilla color roja</i>
Tipo de muestreo:	<i>Alterado</i>

El segundo suelo presenta las siguientes características:

Localización:	<i>Jurica, Qro.</i>
Profundidad de la muestra:	<i>1.50 m</i>
Descripción de la muestra:	<i>Arcilla color negra</i>
Tipo de muestreo:	<i>Alterado</i>

La clasificación del suelo de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) que se determinaron para los suelos en estudio, se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Propiedades índice de los materiales en estudio**

Nombre	Clasificación SUCS	IP (%)	LL (%)	CL (%)	Ss	LP (%)	Color	Arcilla (%)	pH
El Salitre	CH	34.0	59.4	17.2	2.7	25.4	Rojo	81.2	7.5
Jurica	CH	36.0	59.0	14.5	2.6	23.0	Negro	86.3	7.3

Las propiedades índice indicadas en la Tabla 3.1, se determinaron con el material secado al aire.

### **Características de la sal**

Las propiedades típicas de la sal utilizada en el experimento son las siguientes:

#### **Propiedades típicas**

Cloruro de sodio, %  
Humedad, %  
Materia insoluble, %  
Ion calcio, %  
Ion magnesio, %  
Ion sulfato, %  
Malla US: 4  
Malla US 16  
pasa US 16

#### **Límites**

99.300 – 99.720  
2.011 – 3.600  
0.007 – 0.177  
0.035 – 0.910  
0.002 – 0.074  
0.125 – 0.355  
20 – 55%  
50 – 70%  
13% max

### **Porcentajes de sal empleados**

Los porcentajes de sal que se fijaron para este estudio fueron los siguientes: 0, 2, 5, 10 y 20%. Estos porcentajes se adicionaron en dos formas: en salmuera (sal diluida en agua destilada) y en grano.

Los porcentajes de sal 0, 2, 5, 10 y 20%, se adicionaron primero en salmuera, para ambos suelos, de la siguiente manera:

El porcentaje de sal se agregó en peso del agua, es decir, en un litro de agua destilada se adicionaron 20, 50, 100 y 200 g de sal para 2, 5, 10 y 20% respectivamente, para el caso de la sal en salmuera.

Para el caso de la sal en grano, ésta se adicionó en los porcentajes 2, 5 y 10 en peso seco del suelo en cuestión.

Para el caso de los Límites de Atterberg se trabajó con 0, 5 y 10% de sal en salmuera (sal diluida en agua destilada) y para el pH, se trabajó con 0, 1, 2, 5, 10 y 20% de sal.

### **Análisis granulométrico de la sal en grano**

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos al realizar el análisis granulométrico de la sal.

**Tabla 3.2 Granulometría de la sal utilizada en el estudio**

Malla No.	Peso retenido g	Retenido parcial %	Material que pasa %
1/2"	363.00	0.80	99.20
3/8"	1 738.00	3.90	95.30
4	14 707.00	32.40	62.90
10	20407.00	45.00	17.90
20	6782.04	15.00	2.90
40	1 150.54	2.50	0.40
70	182.04	0.40	0.00
100	6.54	0.00	
SUMA	45 336.16	100.00	

Con la granulometría obtenida se decidió trabajar con los porcentajes retenidos a partir de la malla No.10 hasta los porcentajes retenidos en la malla No.70.

Para cada probeta se pesaron 1,500 g. de material, a las cuales se les adicionó la sal en peso del material, es decir, para 2% de sal, se calcula el 2% de 1500g, lo que da como resultado 30, estos 30 son los gramos de sal que se adicionan a la muestra de suelo. El cálculo anterior se realiza de manera similar para los otros porcentajes. En la Tabla 3.3 se muestran las dosificaciones utilizadas en los porcentajes de sal.

**Tabla 3.3 Dosificaciones utilizadas en los porcentajes de sal**

Retenido en mallas	Para 2%	Para 5%	Para 10%
10	21.5 g	53.7 g	107.3 g
20	7.1 g	17.8 g	35.7 g
40	1.2 g	3.0 g	6.0 g
70	0.2 g	0.5 g	1.0 g
Suma	30.0 g	75.0 g	150.0 g

### **3.2 Ensayes de laboratorio**

A continuación se describen los ensayos de laboratorio realizados a los materiales en estudio.

#### **Equipo utilizado en la determinación del módulo de resiliencia y resistencia a la compresión simple**

Se utiliza un equipo triaxial dinámico fabricado por Geotechnical Consulting & Testing Systems (GCTS), para las pruebas de módulo de resiliencia y compresión simple. Este equipo fue diseñado entre otras funciones para aplicar carga repetida a la muestra de suelo, lo que intenta simular el estado de esfuerzos producido por muchos vehículos en movimiento. Gergan (1972) demostró que los datos obtenidos de este tipo de pruebas dan resultados más cercanos al comportamiento en campo

Las unidades básicas del equipo triaxial cíclico son: la de regulación de aire comprimido con una capacidad de 1000 kPa, y bomba de vacío. La unidad de aplicación de carga que consta de un marco de carga (con capacidad de 13 kN), una celda triaxial, transductores o sensores que se utilizan para la medición de los parámetros de interés; entre ellos se cuenta con:

1. Celda de carga de 200 kg.
2. Sensor de deformación (LVDT) con rango  $\pm 25$  mm.
3. Sensor de deformación (LVDT) con rango  $\pm 1.27$  mm.
4. Transductores diferenciales de presión con rango de 1000 kPa.

Se cuenta además con la unidad de registro que tiene un programa integrado, que permite al usuario ejecutar pruebas automáticamente, incluye el control automático

de los esfuerzos axiales y de la presión de confinamiento así como la generación automática de reportes y resultados, etc. En la Figura 3.1 se ilustra el equipo triaxial cíclico utilizado en el presente estudio.



**Figura 3.1 Equipo Triaxial**

La determinación del módulo resiliente se realizó con base en el Protocolo P46, el cual es una modificación de la AASHTO T274-82. La prueba actual propuesta por SHRP, consiste de 15 etapas de carga. La carga se aplica durante 100 ciclos y en los últimos cinco ciclos se calcula el módulo de resiliencia. Este procedimiento requiere de tres presiones de confinamiento y esfuerzos desviadores del rango de 13.8 kPa a 69 kPa.

Contrario a lo que recomienda la AASHTO, el procedimiento SHRP sólo requiere de dos etapas de acondicionamiento. Además en las últimas cinco etapas del procedimiento AASHTO se aplican presiones de confinamiento de cero, mientras que en el procedimiento SHRP, las presiones de confinamiento son de 13.8 kPa como mínimas.

**Tabla 3.4 Procedimiento para módulo de resiliencia en suelos tipo II (Suelos Finos) propuesto por SHRP**

Secuencia	Presión de confinamiento	Esfuerzo desviador	Número de Repeticiones
	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	
0*	41.1	27.6	100
0*	41.4	27.6	100
1	41.4	13.8	100
2	41.4	27.6	100
3	41.4	41.4	100
4	41.4	55.2	100
5	41.4	69.0	100
6	27.6	13.8	100
7	27.6	27.6	100
8	27.6	41.4	100
9	27.6	55.2	100
10	27.6	69.0	100
11	13.8	13.8	100
12	13.8	27.6	100
13	13.8	41.4	100
14	13.8	55.2	100
15	13.8	69.0	100

\*Etapas de acondicionamiento (minimizar efectos de irregularidades en el contacto cabezal-muestra, además remover la deformación permanente)

### Expansión libre

Para las pruebas de presión y porcentaje de expansión se utilizó el consolidómetro de expansión libre con anillo fijo.

Para la determinación de la magnitud de presión y porcentaje de expansión, se utilizó el procedimiento ASTM. A continuación se hace mención de algunos aspectos significativos de este procedimiento.

En cuanto al consolidómetro, señala que el diámetro del anillo no debe ser menor de 2 pulgadas y la altura no mayor de tres décimos del diámetro ni menor de 3/4 de pulgada, para especímenes de diámetro pequeño menores alturas introducen errores causados por la magnitud del remoldeo en la superficie, mientras que

alturas grandes causan fricción excesiva. El diámetro de los anillos utilizados en el experimento es de 63.5 mm y con una altura de 19.7 mm aproximadamente, con lo cual se observa que cumplen con las especificaciones de la norma.

El aparato debe permitir el movimiento vertical en la parte superior e inferior de la pastilla, a medida que la expansión se desarrolla. Una vez colocada la pastilla en el anillo y éste en el consolidómetro, se aplica una sobrecarga de sitio especificada, en estado de humedad natural, se registra la altura inicial del espécimen, se llena la cazuela con agua destilada (para evitar la influencia de cloro o sales del agua del lugar) y se permite la saturación de la pastilla por capilaridad.

El espécimen debe expandirse libremente, el tiempo que sea necesario, hasta que no exista cambio volumétrico apreciable en la pastilla. Una vez que la expansión ha cesado, se empieza el proceso de carga para llegar al volumen inicial como se mencionó anteriormente. La carga se realiza con incrementos convenientes, de tal manera que se defina la curva de compresibilidad de manera adecuada. En este caso, los incrementos se realizaron duplicando el esfuerzo inmediato anterior; cada carga es mantenida al menos 24 h, y según evolucione la deformación en el espécimen, pueden requerirse periodos mayores. Lo anterior se realiza hasta recuperar la expansión sufrida, con el fin de determinar la presión de expansión.

### **3.3 Elaboración de especímenes**

A continuación se explica el procedimiento que se siguió en la elaboración de las probetas.

#### **Tiempo de curado**

Una de las variables en el procedimiento de preparación de probetas, es el tiempo de curado del material, el cual es el lapso comprendido entre el momento en que se añade el agua a la muestra y el momento de compactación del mismo, lo que permite una distribución uniforme del agua. Se recomienda para la mayoría de los suelos fijar como tiempo de curado 24 horas.

En los suelos estudiados se siguió lo anteriormente recomendado. Posteriormente se dejaron secar al aire los materiales en estudio, se les determinó la humedad y se les añadió agua a punto de neblina, hasta alcanzar la humedad deseada, agregando un cierto porcentaje en exceso de agua, para compensar las pérdidas por evaporación.

## **Preparación de probetas para los ensayos**

Conviene señalar que para determinar el valor del módulo de resiliencia de un suelo compactado es necesario desarrollar pruebas en muestras que tengan las propiedades más parecidas a las condiciones que estará sujeto el material en el campo. Cuidando en la preparación de las muestras de que se tengan los mismos pesos específicos, contenidos de agua y los mismos porcentajes de sal para el caso del presente estudio.

Para determinar los valores de presión y porcentaje de expansión de un suelo compactado se tiene que en estos valores influyen el contenido de agua inicial y el peso volumétrico seco.

El método de compactación empleado para la elaboración de las probetas fue el de impactos, variando en ellas el contenido de agua, los tiempos de curado y los contenidos de sal; todas las probetas se trabajaron dentro de un espacio de compactación Próctor estándar.

La cantidad de suelo que se preparó para cada muestra fue de 1500 g, el cual se homogeneizó para los diferentes contenidos de sal y humedades correspondientes. Las muestras se dejaron curar 24 horas, y posteriormente se compactaron.

## **Procedimiento de compactación**

Se compacta el espécimen de prueba en un molde metálico de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura se compacta el espécimen con un pisón con altura de caída de 13.6 cm, con 51 y 102 golpes, tratando de reproducir las energías Próctor y Próctor Modificada, respectivamente.

## **Tiempo de reposo**

Al lapso transcurrido entre el momento de la compactación y el inicio de la prueba, se le denomina tiempo de reposo. Los tiempos de reposo fijados para los ensayos de módulo de resiliencia, resistencia a la compresión, presión y porcentaje de expansión, fueron 0 y 7 días. Las probetas se dejaron reposar para su ensaye, envolviéndolas en un plástico adherible, y almacenadas en un cuarto de temperatura constante para evitar la pérdida de humedad.

## 4 Análisis de resultados

---

En este capítulo se presentan y discuten las principales propiedades físicas y mecánicas de los suelos en estudio, así como la influencia en éstas por la adición de cloruro de sodio, para diferentes porcentajes.

### 4.1 Límites de Atterberg y pH

#### Influencia de la sal en los Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos de los Límites de Atterberg para el material Jurica se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Características de plasticidad para el material Jurica**

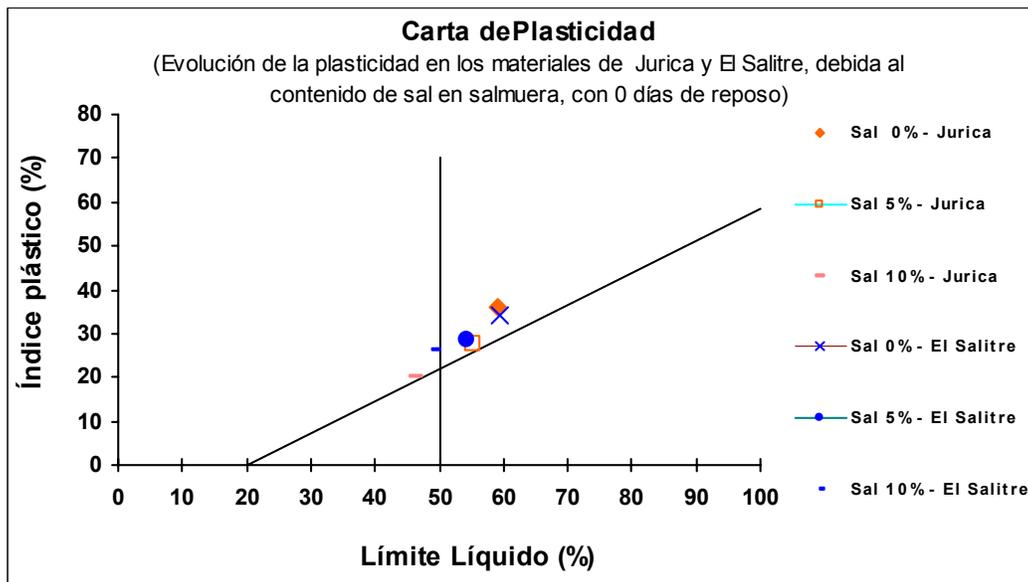
Clasificación SUCS	IP (%)	LL (%)	CL (%)	Días de reposo	LP (%)	Color	Sal (%)
CH	36.0	59.0	14.5	0	23.0	negra	0
CH	27.6	55.2	16.0	0	27.6	negra	5
CL	20.3	46.4	15.0	0	26.2	negra	10
CH	36.2	55.6	16.1	7	19.4	negra	5
CL	25.6	49.6	14.7	7	24.0	negra	10

Los resultados de los Límites de Atterberg para el material El Salitre se presentan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Características de plasticidad para el material El Salitre**

Clasificación SUCS	IP (%)	LL (%)	CL (%)	Reposo (días)	LP (%)	Color	Sal (%)
CH	34.0	59.4	17.2	0	25.4	roja	0
CH	28.4	54.4	16.7	0	25.9	roja	5
CL	26.4	48.8	14.0	0	22.4	roja	10
CH	34.1	55.6	----	7	21.5	roja	5
CL	19.0	38.7	16.0	7	19.7	roja	10

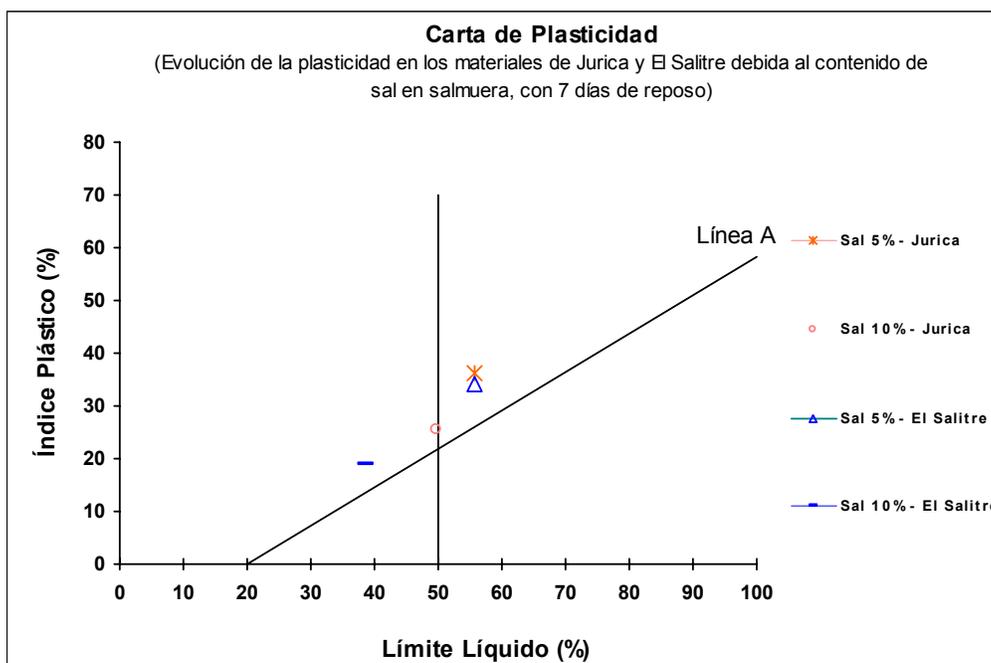
Los resultados de los límites de plasticidad se muestran, en las Figuras 4.1 y 4.2. Se observa como a medida que se incrementa el contenido de sal, los materiales (Jurica y El Salitre) disminuyen su plasticidad. Cuando ambos suelos tienen 10% de sal, pasan de arcillas de alta compresibilidad (CH), a arcillas de baja compresibilidad (CL), es decir, pasan al lado izquierdo de la línea B en la carta de plasticidad. Si se observa y se comparan los valores registrados en ambos suelos se tiene que resultaron más bajos los valores del material Jurica.



**Figura 4.1 Comparación de los Límites de Atterberg, con 0 días de reposo para los materiales El Salitre y Jurica**

En la Figura 4.1 se observa que a medida que se incrementa el contenido de sal, ambos suelos pasan de ser una arcilla de alta compresibilidad (CH), a una arcilla de baja compresibilidad (CL), cuando tienen 10% de sal. En la Figura 4.2 se observan los resultados obtenidos en los límites de plasticidad con 7 días de reposo para ambos materiales.

Se observa que el reposo no influye de manera considerable en los resultados obtenidos. Pues si se comparan los valores registrados para 0 días de reposo se tiene que éstos, son parecidos a los valores obtenidos con 7 días de reposo.



**Figura 4.2 Comparación de los Límites de Atterberg, con 7 días de reposo para los materiales El Salitre y Jurica**

## 4.2 Resultados de los valores de pH

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de la prueba de potencial de hidrógeno (pH), con distintos porcentajes de sal, realizada para los materiales en estudio.

**Tabla 4.3 Potencial de hidrógeno (pH) para los materiales en estudio**

Suelo	pH (0% Sal)	pH (1% Sal)	pH (2% sal)	pH (5% sal)	pH (10% sal)	pH (20% sal)
Salitre	7.34	7.13	6.79	6.60	6.52	6.09
Jurica	7.48	6.93	6.86	6.76	6.45	6.05

Se observa que el valor del pH disminuye al aumentar el porcentaje de sal adicionado, pasando de un valor de 7.4 a valores del orden de 6. Cabe mencionar que las determinaciones de pH se realizaron a 18.5 °C.

### 4.3. Características de compactación

En la Figura 4.3 se muestran las curvas de compactación Próctor estándar, obtenidas con material secado al aire, y con 0 y 20% de sal en salmuera para el material El Salitre.

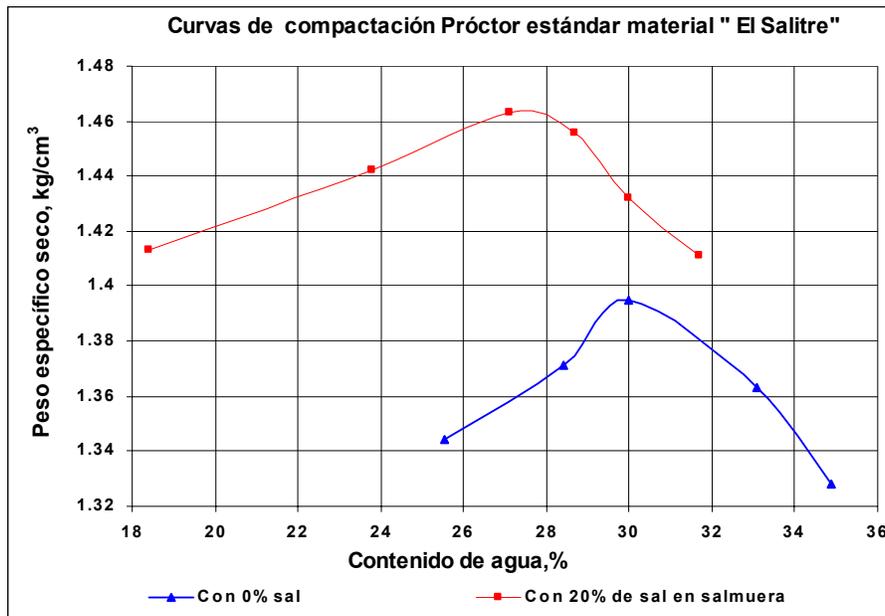
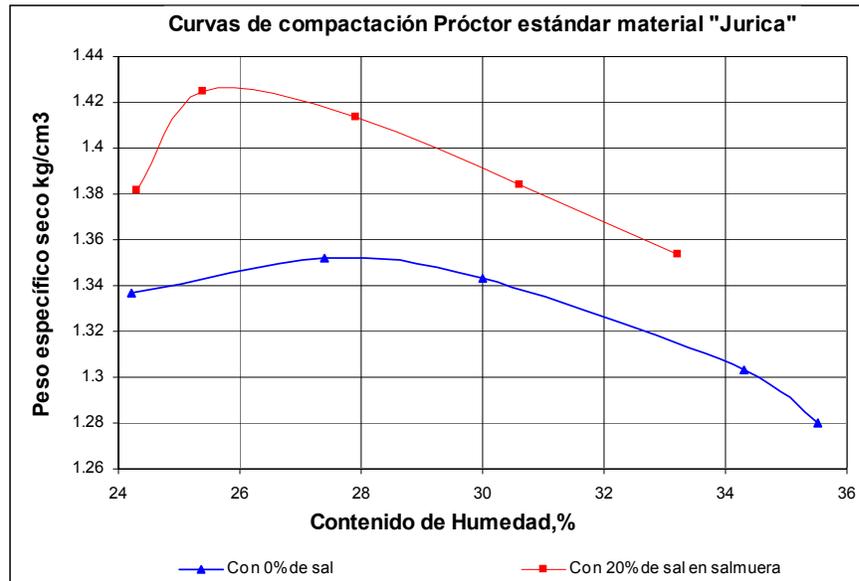


Figura 4.3 Curvas de compactación Próctor estándar para el suelo El Salitre

En la Figura 4.4 se muestran las curvas de compactación Próctor estándar, obtenidas con el material secado al aire y con 0 y 20% de sal en salmuera para el material Jurica.



**Figura 4.4 Curvas de compactación Próctor estándar para el suelo Jurica**

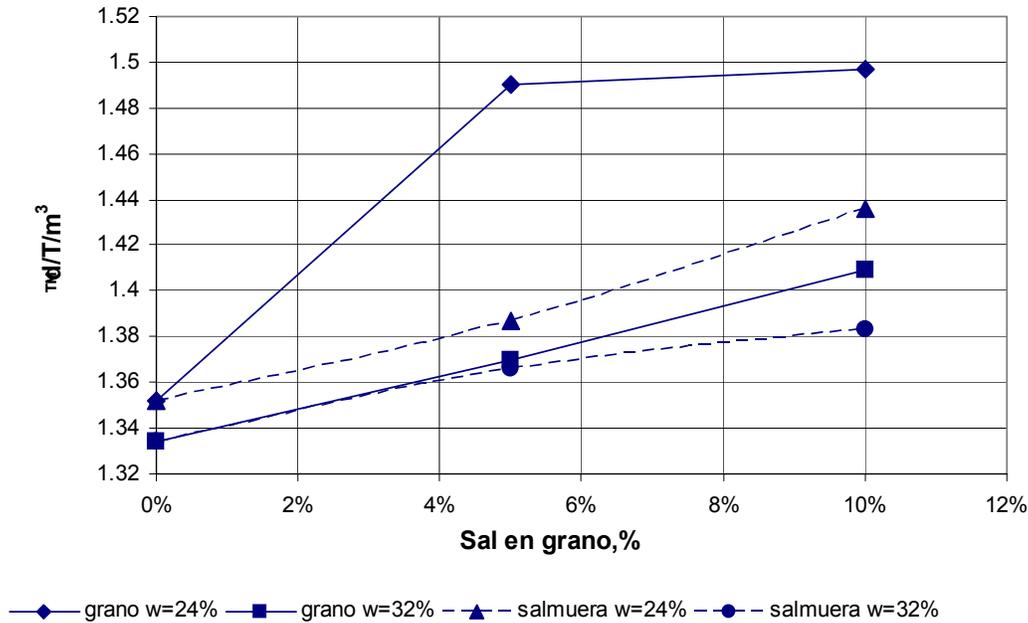
Como se puede apreciar, la adición de cloruro de sodio contribuye al aumento del peso volumétrico seco máximo y a la disminución del correspondiente contenido de agua de compactación.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados que se obtuvieron en el peso volumétrico seco, con la adición de sal en el material El Salitre, para las condiciones de humedad indicadas.

**Tabla 4.4 Evolución del peso volumétrico seco, con la adición de sal para el material El Salitre**

Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	w (%)	Sal (%)	Método de adición de sal
962.49	1.352	24.84	0	-----
982.55	1.387	24.26	5	Salmuera
1016.02	1.436	24.09	10	Salmuera
1009.95	1.334	32.77	0	-----
1028.54	1.336	32.10	5	Salmuera
1046.28	1.383	32.63	10	Salmuera
1056.16	1.490	24.36	5	Grano
1059.18	1.497	24.09	10	Grano
1009.95	1.334	32.77	0	-----
1039.93	1.370	32.87	5	Grano
1061.05	1.409	32.07	10	Grano

En la Figura 4.5 se presenta la influencia que tiene la sal en el peso volumétrico seco para el material El Salitre, compactado con energía Próctor estándar, para dos diferentes contenidos de agua; elegidos de la curva de compactación, de tal manera que se tenga un punto del espacio Próctor, en la rama seca y uno en la rama húmeda.



**Figura 4.5 Influencia del porcentaje de sal en el peso volumétrico seco del material El Salitre**

Se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de sal en las probetas, los pesos volumétricos secos resultan ser más altos, para ambos contenidos de agua, sin embargo cuando las probetas tienen 32% de humedad los pesos volumétricos secos resultan más bajos en comparación con los que tienen 24% de humedad; lo cual puede deberse a la posición relativa que estos puntos guardan en el espacio Próctor.

Se puede apreciar también que al igual que con la adición de sal en salmuera, que el peso volumétrico seco se incrementa con el aumento de la sal en grano. Al comparar los resultados de la adición de sal en grano con los de la sal en salmuera, se observa que los pesos volumétricos secos son mayores cuando se adiciona sal en grano al suelo. Es de esperarse tales discrepancias, dado que existen diferencias en las concentraciones de sal que el suelo presenta para ambos métodos de adición de sal, mientras que al mezclar el suelo con sal en

grano, se tiene un control más preciso de la cantidad de sal por peso seco del suelo; para el método de adicionar sal en salmuera, se dosifican las concentraciones de sal por unidad de volumen de agua y dicha solución se aplica al suelo para proporcionar las humedades de compactación convenientes; con la correspondiente variación en la cantidad de sal por peso seco del suelo.

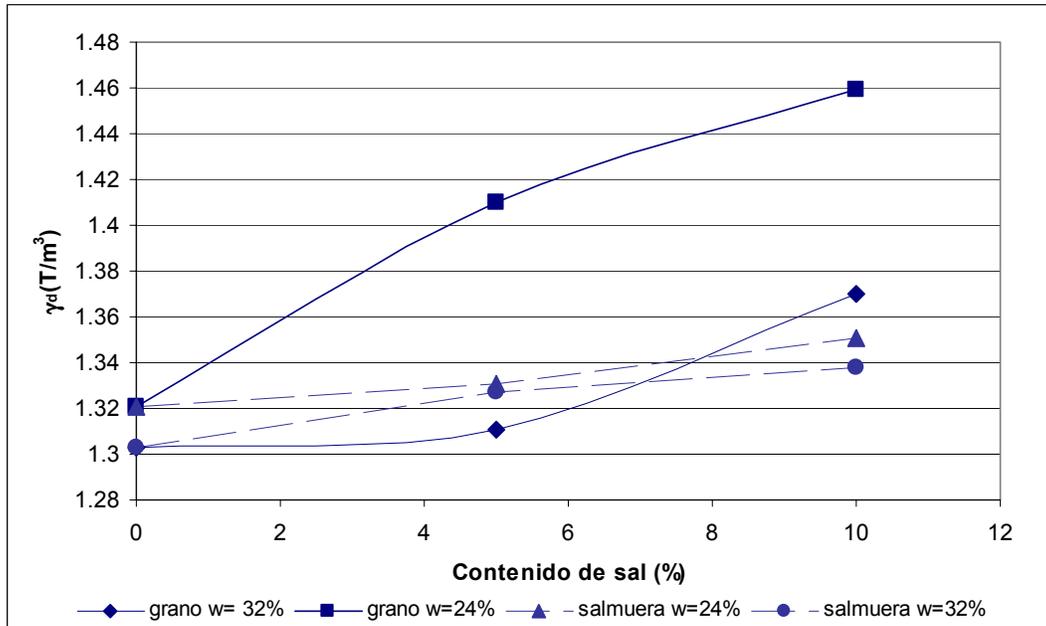
En lo que toca al suelo Jurica, se presenta en la Tabla 4.5 la variación del peso volumétrico seco, con la adición de sal en salmuera.

**Tabla 4.5 Variación del peso volumétrico seco, con la adición de sal para el material Jurica**

Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Sal (%)	Método de adición de sal
940.67	1.321	24.90	0	-----
942.45	1.331	24.19	5	Salmuera
955.73	1.351	24.03	10	Salmuera
988.53	1.303	32.90	0	-----
1004.30	1.327	32.80	5	Salmuera
1008.08	1.338	32.10	10	Salmuera
940.67	1.321	24.90	0	-----
1000.61	1.410	24.66	5	Grano
1030.60	1.459	24.07	10	Grano
988.53	1.303	32.90	0	-----
991.75	1.311	32.68	5	Grano
1031.31	1.370	32.09	10	Grano

Al igual que en el caso del material El Salitre, se observa un incremento en el peso volumétrico seco del material con el incremento del contenido de sal en salmuera en el agua de compactación. Lo anterior, se observa en la Figura 4.6, asimismo, se vuelven a presentar mayores pesos volumétricos para contenidos de sal de 24% dada su posición respecto al óptimo de compactación en el espacio Próctor.

De lo anterior se desprende que independientemente de la manera en que se adiciona la sal al suelo, ya sea por medio de salmuera o de sal en grano, el peso volumétrico seco aumenta con el incremento de dicha sal. Además, cuando las probetas contienen sal en grano, se obtienen valores más altos en el peso volumétrico seco en comparación con las probetas compactadas con salmuera.



**Figura 4.6 Influencia del porcentaje de sal en el peso volumétrico seco del material Jurica**

#### 4.4 Características de expansión

Se discute la influencia de la sal en salmuera y en grano en la presión y porcentaje de expansión observada en los ensayos realizados para los materiales El Salitre y Jurica.

En la Tabla 4.6 se presenta un resumen de los resultados de expansión para el material El Salitre. En dicha tabla se muestran los valores registrados de la presión y porcentaje de expansión alcanzado, además se pueden observar los contenidos de agua de los ensayos antes y después de la prueba, así como los contenidos de sal y los pesos de las muestras con cero días de reposo.

En la Figura 4.7 se presenta la influencia del contenido de agua en el porcentaje de expansión para el suelo del "Salitre"; tanto para el suelo natural como para la mezcla con 2% de sal.

Tabla 4.6 Expansión libre, con 0 y 7 días de reposo para el material El Salitre

Porcentaje de Expansión (%)	Presión de expansión (%)	Humedad antes de ensaye (%)	Humedad después de ensaye (%)	Peso de la muestra (g)	Reposo (Días)	Sal en salmuera (%)
5.47	0.63	25.86	30.27	945.32	0	0
2.83	0.70	29.30	33.49	967.87	0	0
2.36	0.72	33.85	37.44	983.00	0	0
2.67	0.83	25.25	34.06	978.43	0	2
2.37	0.79	29.61	34.76	1001.83	0	2
1.01	0.30	32.98	36.93	1023.34	0	2
4.31	0.60	21.60	34.21	951.89	7	0
2.46	0.88	25.53	32.64	974.85	7	0
2.17	0.75	28.93	32.59	991.12	7	0
3.38	0.61	20.58	32.80	949.13	7	2
1.99	1.00	24.56	33.02	997.95	7	2
0.93	0.36	28.07	32.76	1005.08	7	2

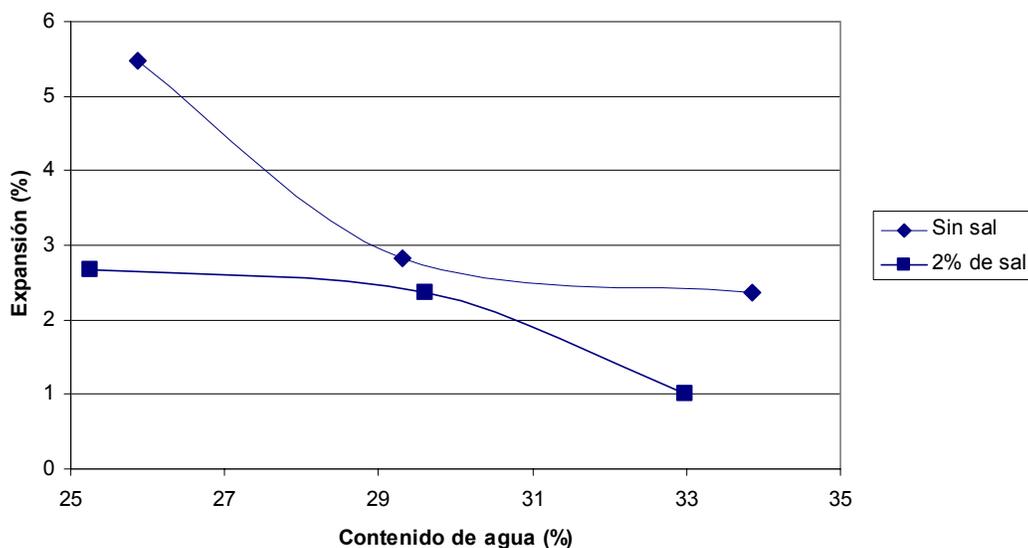


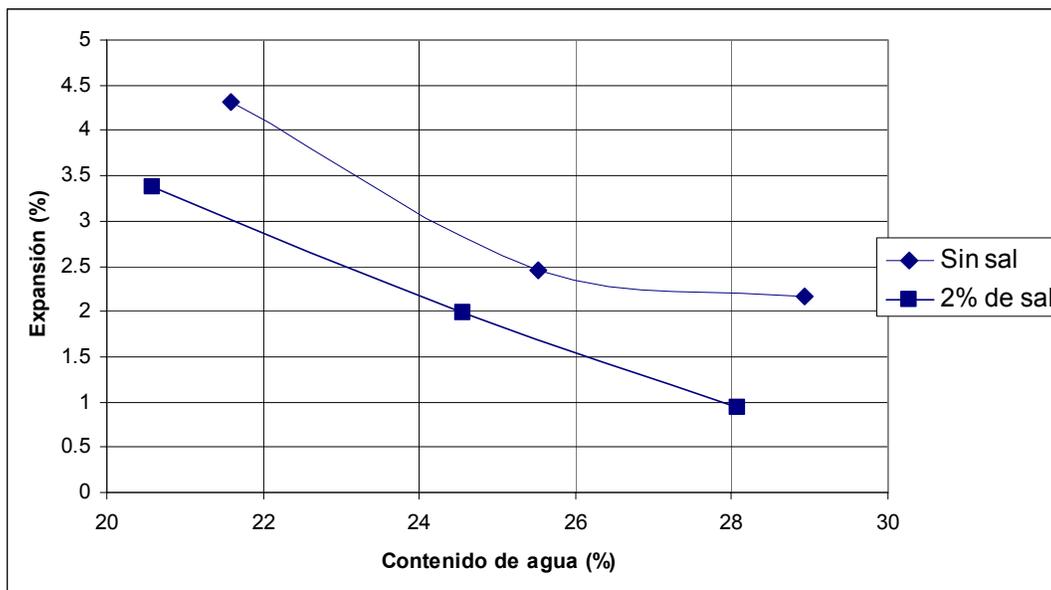
Figura 4.7 Relación entre el porcentaje de expansión y el contenido de agua para el material El Salitre

De la Figura 4.7 se desprende que el porcentaje de expansión disminuye con el incremento en el contenido de agua de los suelos; además, para el suelo con sal se observan menores porcentajes de expansión.

Para la muestra con humedad inicial de 25% aproximadamente se presentan valores de expansión en más del doble respecto a la muestra que presenta humedad de 33%. Lo anterior muestra lo delicado que puede resultar tratar con suelos arcillosos compactados en la rama seca de la curva de compactación.

En la misma Tabla 4.6 se muestran los porcentajes y las presiones de expansión para el material El Salitre con siete días de reposo. En lo que respecta al porcentaje de expansión, se siguen registrando valores más altos en los ensayos que contienen humedades bajas. En lo que se refiere a la presión de expansión, los valores más bajos se registraron para las probetas dosificadas con 2% de sal, en esta ocasión adicionada en salmuera.

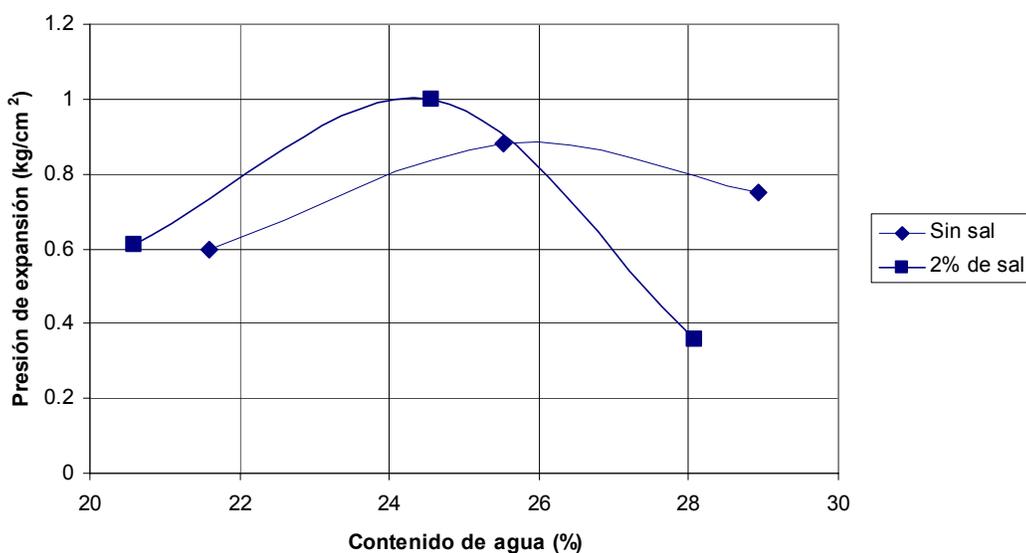
En la Figura 4.8 se observa que las probetas que tenían un alto contenido de agua, registraron los valores más bajos en porcentaje de expansión. Lo anterior concuerda con lo encontrado en la literatura de suelos compactados. Asimismo, se presenta menor porcentaje de expansión para las probetas con sal.



**Figura 4.8 Influencia de la sal en salmuera en el porcentaje de expansión con 0 días de reposo para el material El Salitre**

En la Figura 4.9 se presenta la variación del porcentaje de expansión con el contenido de agua. Se observa que el valor más alto de presión de expansión se presenta para el punto más cercano al óptimo de compactación y disminuye para los puntos ubicados tanto en la rama seca como en la húmeda de la curva de compactación Próctor. De lo anterior podría decirse que la presión de expansión

se ve influenciada de manera más importante por el peso volumétrico del material que por el contenido de agua y que a mayores pesos volumétricos, se presenta mayor presión de expansión en los suelos; sin embargo es importante destacar que, aunque menor, pero existe influencia del contenido de agua en la presión de expansión de un suelo.



**Figura 4.9 Expansión (%) con 7 días de reposo, para el material El Salitre**

Para el material Jurica se presenta, en la tabla 4.7 la variación de sus características expansivas con la cantidad de sal añadida. En este caso se compactaron las probetas con la energía Próctor modificada.

**Tabla 4.7 Expansión libre para probetas conformadas con energía Próctor modificada, para el material Jurica (sin reposo)**

Porcentaje de expansión (%)	Presión de expansión (%)	Humedad		Peso de la muestra (g)	Contenido de sal (%)
		Antes de expansión (%)	Después de expansión (%)		
11.7	1.3	18.7	36.35	938.30	0 s*
13.5	3.9	18.4	31.87	959.78	5 s
16.1	5.3	18.7	39.98	947.27	10 s
11.6	1.8	18.4	35.21	930.11	0 g
13.3	4.6	18.9	31.87	953.55	2 g
12.0	3.8	18.9	30.95	999.44	5 g

\* Nota: s: salmuera      g: grano

En la Tabla anterior se observa que el porcentaje de expansión se incrementa con el contenido de sal en salmuera. Lo anterior, independientemente de la manera en la que se incorpora la sal al suelo, ya sea en salmuera o en grano.

Por lo que respecta a la presión de expansión se tiene que los valores más altos se presentan para los contenidos más altos de sal.

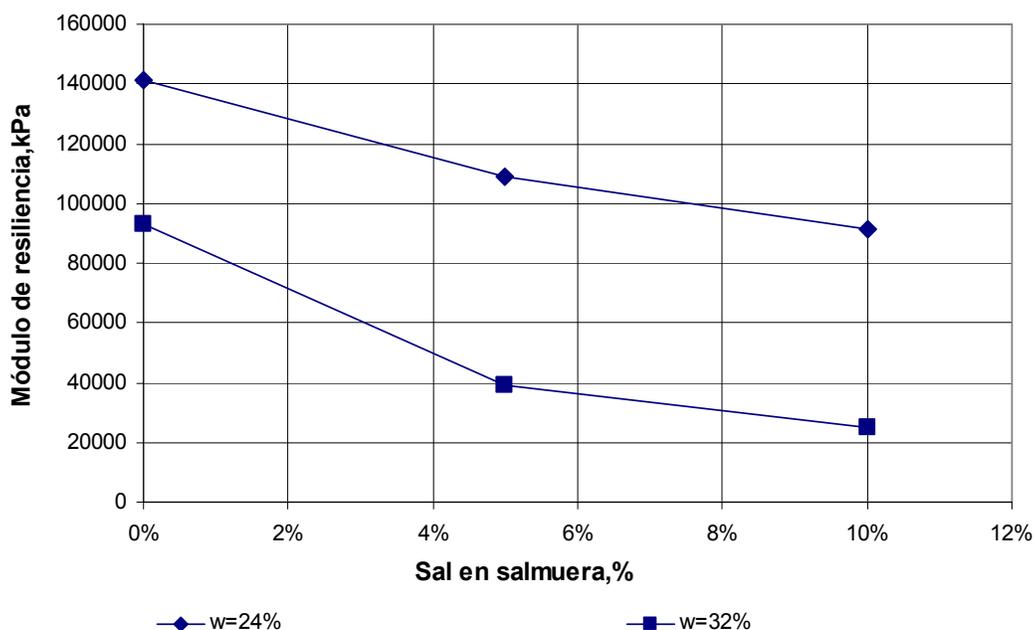
#### 4.5 Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión

Se analiza ahora la influencia de la sal en las propiedades mecánicas de los materiales en estudio. En la Tabla 4.8 se indican los valores de módulos de resiliencia obtenidos en las probetas que tenían 0, 5 y 10 % de sal en salmuera, con contenidos de agua ubicados en la rama seca y húmeda del espacio de compactación Próctor.

**Tabla 4.8 Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión en probetas con sal en salmuera para el material El Salitre**

Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Resistencia a la compresión (kPa)	Módulo de resiliencia					Sal (%)
				13 kPa	27 kPa	39 kPa	55 kPa	69 kPa	
962.49	1.352	24.84	291	283000	196000	160000	145000	141000	0
982.55	1.387	24.26	189	342000	166000	130000	116000	109000	5
1016.02	1.436	24.09	186	122000	105000	97800	93500	91600	10
1009.95	1.334	32.77	----	147000	115000	102000	95900	93300	0
1028.54	1.366	32.10	----	221000	60500	48900	41300	39000	5
1046.26	1.383	32.63	145	176000	83700	38600	29700	25200	10

En la Figura 4.10 se puede observar que el módulo de resiliencia del material disminuye con el incremento del contenido de sal; así se tiene que el valor del módulo decrece de 141,000 kPa a 91,600 kPa en los ensayos que tenían 24% de contenido agua, con 0 y 10% de sal en salmuera respectivamente, lo que representa una disminución del 35%. En el caso de los ensayos que tenían 32% de agua, se observa un decremento del módulo de resiliencia del orden de 70% para contenidos de sal de 0 y 10%.

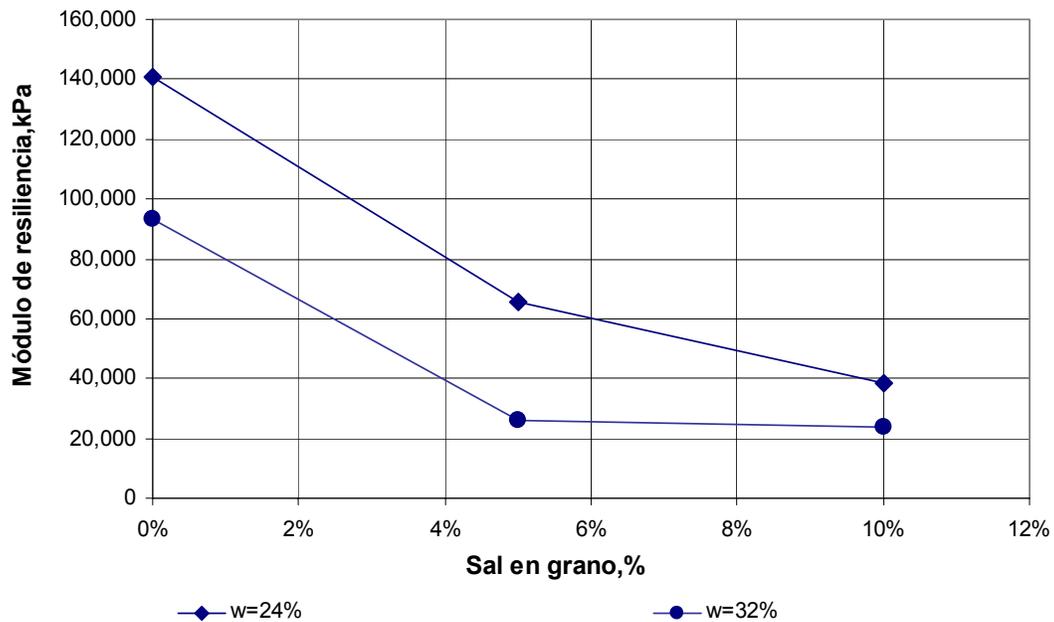


**Figura 4.10 Influencia del porcentaje de sal en salmuera en el módulo de resiliencia para el material El Salitre**

En la Tabla 4.9 se indican los valores obtenidos en el ensaye de módulo de resiliencia para probetas con 0, 5 y 10% de sal en grano. Nuevamente se observa una disminución del módulo de resiliencia con el incremento de sal; lo cual puede verse en la Figura 4.11. La disminución fue del orden de 70 y 75% para probetas del lado seco y húmedo de la curva de compactación, respectivamente.

**Tabla 4.9 Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión en probetas con sal en grano para el material El Salitre**

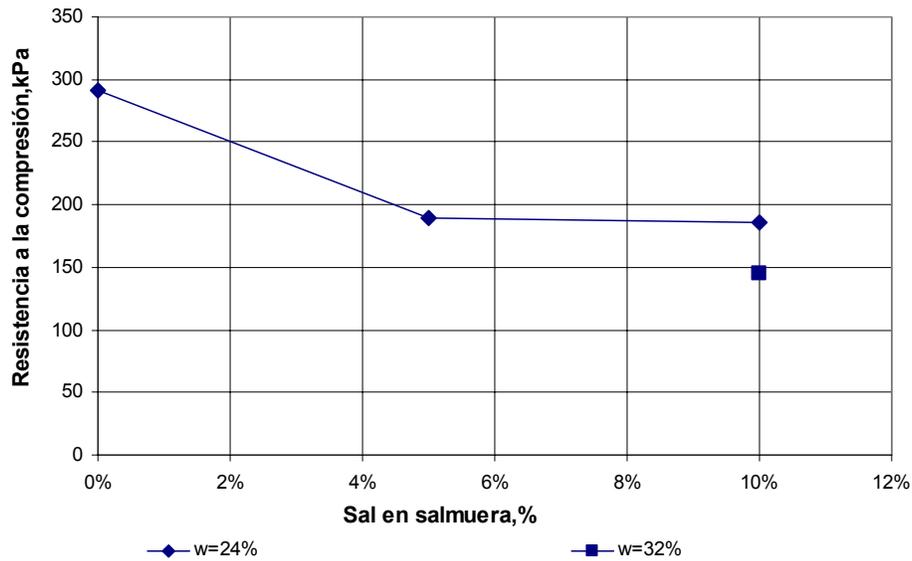
Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Resistencia a la compresión (kPa)	Módulo de resiliencia					Sal (%)
				13 kPa	27 kPa	39 kPa	55 kPa	69 kPa	
962.49	1.352	24.84	291	283000	196000	16000	145000	141000	0
1056.16	1.490	24.36	184	----	220000	95700	73500	65400	5
1059.18	1.497	24.09	176	199000	80400	49500	41700	38400	10
1009.95	1.334	32.77	----	147000	115000	102000	95900	93300	0
1039.93	1.370	32.87	108	188000	136000	47800	29700	25800	5
1061.05	1.409	32.07	104	193000	149000	59900	34000	23700	10



**Figura 4.11 Influencia del porcentaje de sal en grano en el módulo de resiliencia para el material El Salitre**

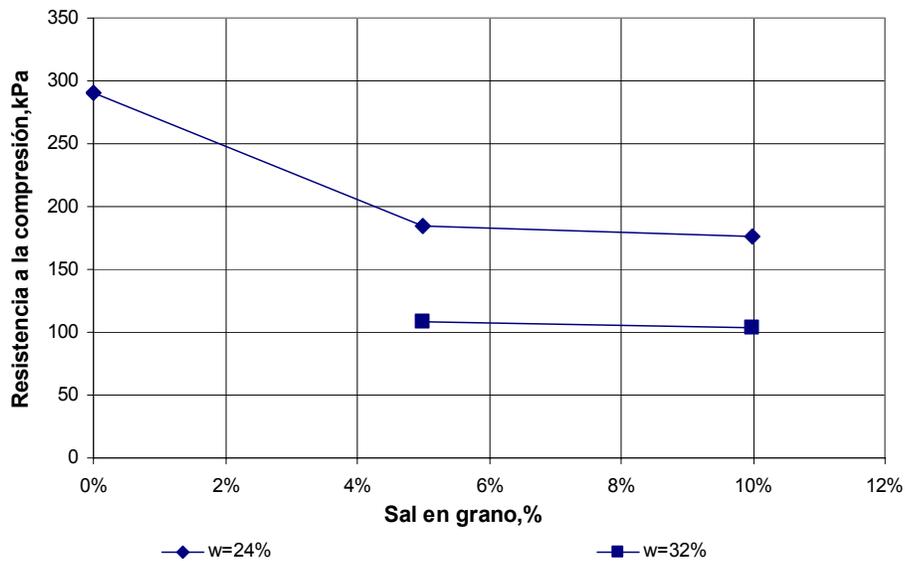
En la Figura 4.12 se observa una disminución en la resistencia a la compresión para el incremento del contenido de sal en las probetas ensayadas. El valor para 0% de sal en salmuera 291 kPa y en la probeta que contiene 10% de sal en salmuera es de 186 kPa, lo que representa una disminución del 36% en dicho parámetro.

Respecto a las probetas a las que se les agregó sal en grano, se observa la misma tendencia, es decir una disminución en la resistencia a la compresión con el incremento del contenido de sal.



**Figura 4.12** Influencia de la sal en salmuera en la resistencia a la compresión para el material El Salitre.

Se puede observar en la Figura 4.13. que para el caso de las probetas que tenían 24% de agua, las resistencias van de 291 kPa a 178 kPa con 0 y 10 de sal en grano respectivamente, lo que implica una disminución del orden del 40%.



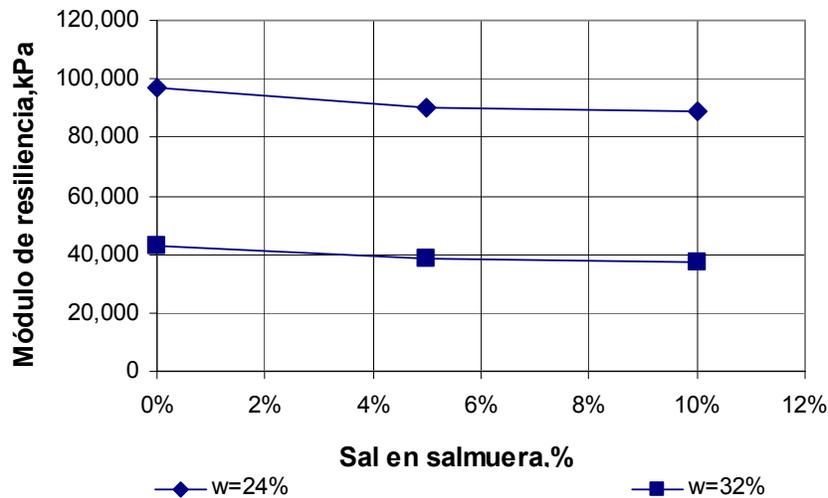
**Figura 4.13** Influencia de la sal en grano en la resistencia a la compresión para el material El Salitre

En la Tabla 4.10 se presentan los módulos de resiliencia para el caso del material Jurica. Los valores que se indican en esta tabla corresponden a las probetas compactadas una en la rama húmeda y otra en la seca, con 0, 5 y 10% de sal en salmuera.

**Tabla 4.10 Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión en probetas con sal en salmuera, para el material Jurica**

Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Resistencia a la compresión (kPa)	Módulo de resiliencia					Sal (%)
				13 kPa	27 kPa	39 kPa	55 kPa	69 kPa	
940.67	1.321	24.90	321	286000	236000	198000	142000	96700	0
942.45	1.331	24.19	260	414000	127000	103000	97600	90000	5
955.73	1.351	24.03	199	232000	128000	104000	95500	89100	10
988.53	1.303	32.90	164	239000	187000	70100	51800	43200	0
1004.3	1.327	32.80	155	208000	164000	80400	49200	38300	5
1008.08	1.338	32.10	145	205000	166000	131000	50200	37200	10

En la Figura 4.14 se observa para el material Jurica una disminución del módulo de resiliencia con el incremento de sal; es importante mencionar que dicha disminución fue del orden de 7 y 13% para los puntos en la rama seca y húmeda, respectivamente.



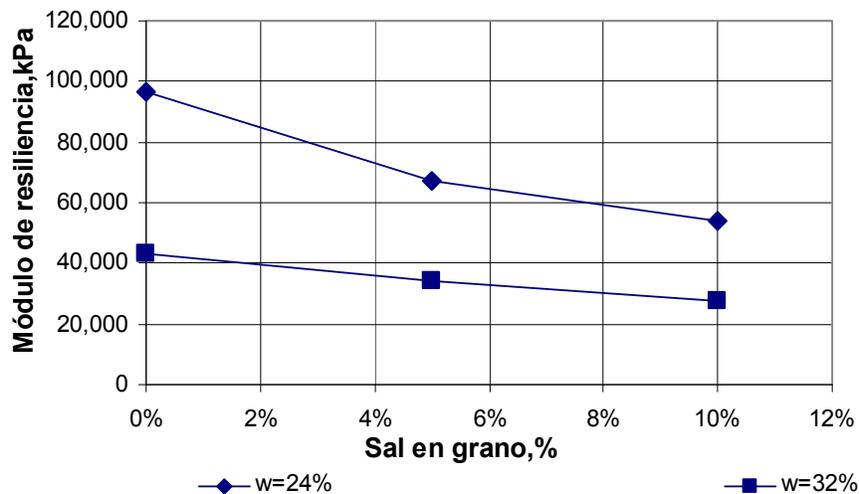
**Figura 4.14 Influencia del porcentaje de sal en salmuera en el módulo de resiliencia para el material Jurica**

En la Tabla 4.11 se presentan los módulos de resiliencia para el caso del material Jurica, nuevamente se observa que la sal en el suelo produce una disminución del módulo de resiliencia. En la Figura 4.15 se muestra dicho comportamiento.

**Tabla 4.11 Módulo de resiliencia y resistencia a la compresión en probetas con sal en grano, para el material Jurica**

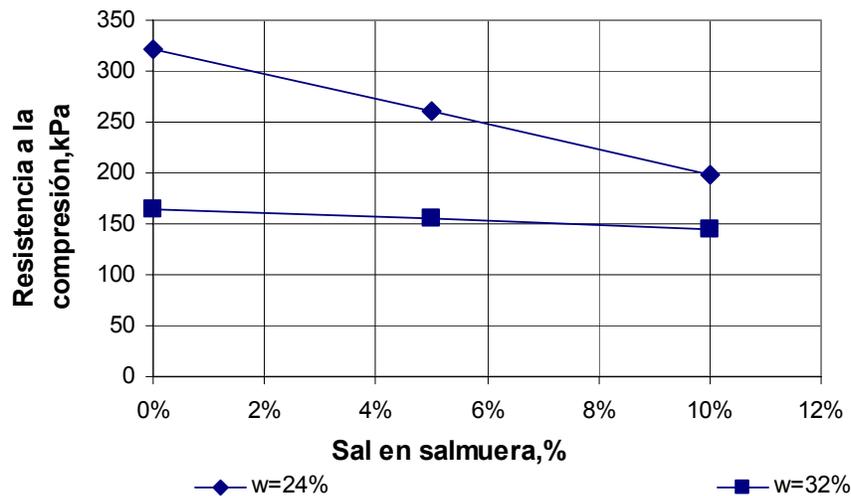
Peso de la muestra (g)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Resistencia a la compresión (kPa)	Módulo de resiliencia					Sal (%)
				13 kPa	27 kPa	39 kPa	55 kPa	69 kPa	
940.67	1.321	24.90	321	286000	236000	198000	142000	96700	0
1000.61	1.410	24.66	218	254000	204000	166000	81600	67200	5
1030.6	1.459	24.07	181	207000	161000	81000	61400	54300	10
988.53	1.303	32.90	155	239000	187000	70100	51800	43200	0
991.75	1.311	32.68	173	157000	61700	44100	37200	33900	5
1031.31	1.370	32.09	85	---	26000	107000	41700	27800	10

Es importante destacar que el módulo de resiliencia se ve mayormente afectado cuando se adiciona la sal en grano. Por otro lado, en el material El Salitre el contenido de sal afecta de manera más importante, en este mismo parámetro, que lo que respecta al suelo Jurica.



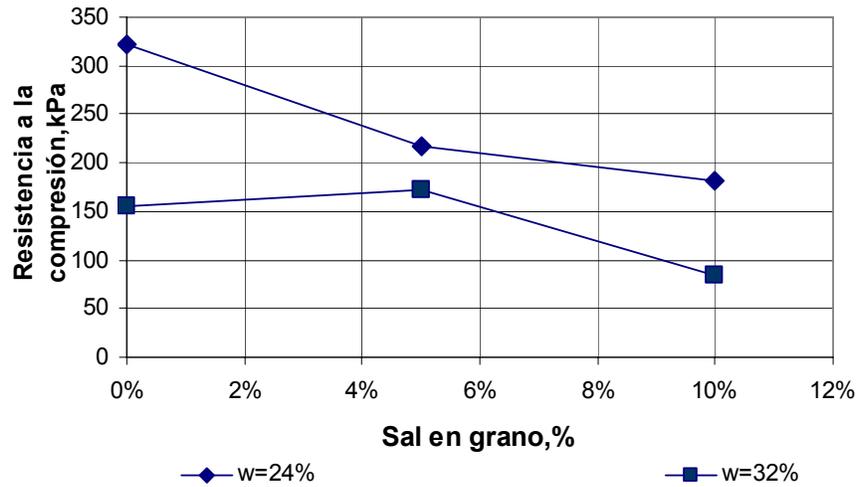
**Figura 4.15 Influencia del porcentaje de sal en grano en el módulo de resiliencia para el material Jurica.**

En la Figura 4.16 se observa la evolución de la resistencia a la compresión, para especímenes que contenían sal en salmuera, en primera instancia se observa una disminución en el valor de la resistencia a la compresión, conforme se va incrementando el contenido de sal en las probetas ensayadas. Así se tiene que para el caso de las probetas que tenían 24 % de agua, las resistencias van de 321 kPa a 199 kPa con 0 y 10% de sal en salmuera respectivamente; en este caso esto representa una disminución del 38%; por otro lado, cuando las probetas tienen 32 % de humedad, y presentan la misma tendencia a disminuir, así se tiene que los valores fueron de 164 kPa a 145 kPa para 0 y 10 % de sal en salmuera, que es un 12% de disminución.



**Figura 4.16 Influencia de la sal en salmuera en la resistencia a la compresión para el material Jurica**

En la Figura 4.17 se observa que la resistencia a la compresión, nuevamente tiende a disminuir a medida que se incrementa el contenido de sal en grano; se tienen resistencias de 321 kPa y 181 kPa, para 0 y 10% de sal en grano respectivamente y con una humedad de 24%; lo anterior representa una disminución del 44%. Para contenidos de agua de 32% presentan 155 kPa y 85 kPa para 0 y 10% de sal en grano respectivamente; lo que representa un 54% de disminución.



**Figura 4.17 Influencia de la sal en grano en la resistencia a la compresión para el material Jurica**

Si se comparan los ensayos que tenían sal en salmuera con respecto a los ensayos que contenían sal en grano, se observa que los valores más altos en la resistencia, se alcanzaron cuando los ensayos tenían sal en salmuera. Respecto a la resistencia a la compresión de ambos materiales se observa que los valores más altos se registran en el material El Salitre.



## 5 Conclusiones y recomendaciones

---

En este capítulo se presentan algunas conclusiones derivadas del presente estudio.

El cloruro de sodio generó modificaciones, tanto en las propiedades índice como en las mecánicas, en los materiales estudiados.

Respecto a la plasticidad de los materiales ensayados, se observa que éstos presentan en estado natural valores muy similares. La posición de los suelos en la carta de plasticidad, en estado natural, está arriba de la línea A y a la derecha de la línea B. por lo que se clasifican como arcillas de alta compresibilidad (CH); conforme se incrementa el contenido de sal, el suelo tiende a moverse hacia la izquierda de la mencionada carta de plasticidad, para clasificarse en el grupo CL.

Se demuestra que el periodo de reposo, entre la adición de sal y el ensaye, no afecta a los valores de plasticidad de los suelos analizados.

Respecto al valor de pH, la influencia de la sal en dicho parámetro, se observa que la sal tiene un efecto similar en ambos suelos, disminuyendo el pH, desde un valor de 7.4 hasta 6.

Por otro lado, se observa que en las características de compactación de los suelos, el peso volumétrico seco aumenta y disminuye el contenido de agua óptimo, con el incremento de la sal. Lo anterior, puede deberse al incremento de los cristales de sal que se suman a los minerales del suelo, y que evidentemente afectan de una u otra manera al contenido de agua y al peso volumétrico seco, quizás solo en apariencia, por una aplicación inadecuada de las definiciones de dichos parámetros para los suelos con sales.

Las características expansivas del suelo, parecen, aunque ligeramente, disminuir para el suelo El Salitre, mientras que para el suelo Jurica tienen una clara tendencia a incrementarse. Es importante mencionar que el incremento en el contenido de agua de las probetas significó una disminución de las características expansivas, pero en mayor medida, del porcentaje de expansión para ambos suelos.

El módulo de resiliencia tiende a disminuir con el incremento de la sal, tanto para el suelo Jurica como El Salitre, y ello independientemente de la manera en la cual se adicione la sal, ya sea en salmuera o en grano.

La resistencia a la compresión en ambos suelos tiende a disminuir al incrementarse el porcentaje de cloruro de sodio.

A la luz de los resultados aquí mostrados, se tiene que la estabilización de suelos con cloruro de sodio, produce diferentes resultados en los suelos así tratados, llegando incluso a producir propiedades más desfavorables en suelos utilizados en la construcción de vías terrestres. Por lo anterior, es importante realizar análisis previos de la influencia del producto estabilizante, sobre las propiedades de interés del suelo que se quiera mejorar.

Es importante mencionar que para el suelo El Salitre, aquí estudiado, se presenta una disminución de las propiedades expansivas, acentuándose dicha disminución con el incremento el contenido de agua del suelo. Sería posible utilizar esta técnica para contenidos de agua por encima del óptimo de compactación, en donde el factor medular del comportamiento del suelo así tratado sería la permanencia de las características iniciales a lo largo de la vida útil del camino.

Se ha mencionado que la sal produce un efecto sobre la tensión superficial en el agua del suelo de tal manera que minimiza su evaporación. Esto podría ser una característica importante para suelos que se compactan con humedades correspondientes a la rama húmeda de la curva de compactación Próctor.

Por consiguiente se concluye que es necesario realizar más estudios en la utilización del cloruro de sodio, particularmente en la permanencia de la sal en los suelos y la probable característica de retención de humedad en el tiempo.

## Bibliografía

---

*El-Metwally Abdel- Aziz Mohamed El-Sekelly. "Characterization of Sodium Chloride Stabilized Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Low-Volume Roads in Egypt*  
Universidad de Leeds, Inglaterra enero 1987.

Fredlund D.G. Rahardjo H., "Soil Mechanics For Unsaturated Soils". John Wiley & Sons INC, 1993.

*Preciado, C. H., Estudio de la influencia de las variables de compactación en las características expansivas de un suelo de Jurica, Querétaro, Tesis de Maestría en ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Octubre 1998*

*Ingles O.G., Soil Stabilization, Principles and Practice. Butterworths Sydney, 1972*

*Avitia, R. "Suelo Cemento". Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto A.C., Asociación Mexicana de Caminos A.C.*

*J.A. Epps, W.A. Dunlap, B.M. Gallaway, D.D. Currin. Soil Stabilization a Mission Oriented Approach. United States Department of the Air Force.*

Garnica A. P., Pérez G. N., Gómez, L.J.A., Módulos de Resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Publicación Técnica No.142 Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro.

Garnica A. P., Pérez G. N., Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos. Publicación Técnica No.165 Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro.

Standard Test Methods for One Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. Designation ASTM D-4546-96

Standard Test Methods for pH for Soils Designation ASTM D-4972-95a.

Standard Specification for Sodium Chloride. Designation: D 632 – 94, D 98 – 98

Technical Manual No. 5-822-14. Air Force Manual No. 32-1019. Headquarters Departments of The Army, and the Air Force Washington, D.C. 25 October 1994.

Yoder, E.J., Witzak, M.W.

“Principles of Pavement Design”. Segunda Edición. Wiley Interscience 1975.

Braja M. Das (1994). “Principles of Geotechnical Engineering”. Boston.

Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A. (1986). “Mecánica de suelos”. Tomo 1,2 y 3. México.

Rico Rodríguez A. y Del Castillo Mejía H. (1994). “La ingeniería de suelos en las vías terrestres”. Vol. 2. México.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683  
Col. Mixcoac  
03730, México, D. F.  
Tel. (55) 56 15 35 75  
55 98 52 18  
Fax (55) 55 98 64 57

**SANFANDILA**

Km. 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro.  
Tel. (442) 2 16 97 77  
2 16 96 46  
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)