

**ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS NO
CONVENCIONALES EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS
CON CEMENTANTES HIDRÁULICOS**

**JUAN CARLOS OROBIO QUIÑONES
TANIA SOFÍA VALENZUELA RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2004**

**ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS NO CONVENCIONALES EN
LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CEMENTANTES
HIDRÁULICOS**

**JUAN CARLOS OROBIO QUIÑONES
TANIA SOFÍA VALENZUELA RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2004**

**ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE PRODUCTOS NO CONVENCIONALES EN
LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS CON CEMENTANTES
HIDRÁULICOS**

**JUAN CARLOS OROBIO QUIÑONES
TANIA SOFÍA VALENZUELA RAMÍREZ**

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres

Director: Ing. Msc Luciano Rivera Caicedo

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2004**

PAGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Firma del Director de Tesis

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Popayán, julio de 2004

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Luciano Rivera Caicedo, Director de la Tesis de Grado, por su dedicación y apoyo durante el desarrollo de todo el estudio.

A la Doctora Cruz Marina Torres por su apoyo y asesoría en el área de química.

A la Universidad del Cauca y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil y al Instituto de Posgrados por su aporte en nuestra formación académica.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y del Instituto de posgrados por su inquebrantable voluntad de colaborar en el desarrollo del trabajo.

A la Química Edna Rocío Cabrera M, la Geotecnóloga Claudia Patricia Correa Vidal y al Señor Jairo Ordóñez por su colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio.

Al personal del Laboratorio de Suelos y Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca por su valiosa colaboración.

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca por el apoyo económico brindado.

A los Ingenieros Giovanni Arango, Dario Motoa y a la firma Andercol S.A. por la asesoría técnica y el suministro de insumos para la investigación.

RESUMEN

La estabilización de suelos es una técnica muy antigua y que en los últimos años ha cobrado vital importancia debido a la escasez de materiales granulares que brinden adecuadas propiedades de resistencia, durabilidad y economía en la construcción de diversos proyectos, adicionalmente se ha encontrado a través de los años que el empleo de técnicas de estabilización permiten la disminución significativa de los costos económicos, sociales y ambientales de las obras de infraestructura.

El presente documento contiene los resultados de la investigación bibliográfica y experimental desarrollada con el objetivo de explorar la eficacia y eficiencia de tecnologías no convencionales en la estabilización de los suelo finos, basándose en la comparación de los resultados obtenidos del empleo de productos alternativos con los resultados que se logran mediante el empleo de las técnicas convencionales de estabilización.

Para el desarrollo del trabajo los investigadores realizaron una amplia revisión de la bibliografía existente a nivel nacional e internacional, dejando plasmado en el documento una compilación de los resultados obtenidos durante esta fase, en el cual se realiza un análisis de los diferentes procesos de estabilización relacionados con el estudio y se trata de explicar los diferentes mecanismos de estabilización.

Para la investigación se utilizaron cinco suelos diferentes de la región de Popayán, a los cuales se les aplicó procedimientos de estabilización con productos convencionales (cal y el cemento) y productos no convencionales (dicloruro de sodio, silicato de calcio, bórax, texilán 553, construcril 1662), evaluando los resultados obtenidos mediante el empleo de pruebas físicas, químicas como son la resistencia a la compresión confinada, la resistencia al agua, el pH y los límites de consistencia.

Durante el desarrollo del documento los autores explican los procedimiento y métodos empleados para la ejecución del estudio realizando los respectivos análisis con el fin de resaltar los aspectos más relevantes permitiendo de esta manera, al lector, una mejor comprensión del estudio, para al final realizar un análisis global de los resultados comparando la eficiencia de los diferentes métodos.

Es de aclarar que en el presente estudio no se pretende calificar o descalificar método alguno, pero si se llama la atención de las potencialidades para el mejoramiento de los suelos finos con métodos alternativos que resulten realmente eficaces y eficientes con el fin de optimizar los recursos de inversión.

CONTENIDO

	Pág.
0. INTRODUCCION	23
0.1 OBJETIVOS	24
0.1.1 Objetivo general	24
0.1.2 Objetivos específicos	24
0.2 JUSTIFICACION	25
0.3 METODOLOGIA	26
1.0 MARCO TEORICO	29
1.1 GENERALIDADES	29
1.1.1 Definiciones	30
1.1.2 Propiedades de los suelos a mejorar	30
1.2 PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS	35
1.2.1 Estabilización Mecánica	35
1.2.2 Estabilización física	39
1.2.3 Estabilización físico-química	40
2. MATERIALES	60
2.1 CARACTERIZACION DE LOS SUELOS	60
2.1.1 Localización y descripción de los suelos	60
2.1.2 Propiedades físicas de los suelos finos	61
2.1.3 Propiedades químicas de los suelos finos	71
2.2 ESTABILIZANTES	97
2.2.1 Cal	97
2.2.2 Cemento	99
2.2.3 Polímeros	102
3. ANALISIS DEL EFECTO DE UN ESTABILIZANTE EN EL SUELO NATURAL	113

3.1	ANALISIS DEL EFECTO DE LA CAL EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	113
3.1.1	Generalidades	113
3.1.2	Resultados	113
3.2	ANALISIS DEL EFECTO DEL CEMENTO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	129
3.2.1	Generalidades	129
3.2.2	Resultados	130
3.3	ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	146
3.3.1	Generalidades	146
3.3.2	Resultados	147
3.4	ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	160
3.4.1	Generalidades	160
3.4.2	Resultados	161
3.5	ANALISIS DEL EFECTO DEL BORAX EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	175
3.5.1	Generalidades	175
3.5.2	Resultados	175
4.	ANALISIS DEL EFECTO DE UN ESTABILIZANTE EN EL SUELO CEMENTO	188
4.1	INTRODUCCION	188
4.2	ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO	188
4.2.1	Generalidades	188
4.2.2	Resultados	189
4.3	ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO	199
4.3.1	Generalidades	199
4.3.2	Resultados	199

4.4	ANALISIS DEL EFECTO DEL TEXILAN 553 EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO	212
4.4.1	Generalidades	212
4.4.2	Resultados	212
4.5	ANALISIS DEL EFECTO DEL CONSTRUCRIL 1662 EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO	223
4.5.1	Generalidades	223
4.5.2	Resultados	223
5.	ANALISIS DEL EFECTO DE UN ESTABILIZANTE EN EL SUELO CAL	234
5.1	INTRODUCCION	234
5.2	ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CAL	234
5.2.1	Generalidades	234
5.2.2	Resultados	235
5.3	ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS-CAL	245
5.3.1	Generalidades	245
5.3.2	Resultados	245
5.4	ANALISIS DEL EFECTO DEL TEXILÁN 553 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	260
5.4.1	Generalidades	260
5.4.2	Resultados	261
5.5	ANALISIS DEL EFECTO DEL CONSTRUCRIL 1662 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS	270
5.5.1	Generalidades	270
5.5.2	Resultados	271
6.	VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	281
6.1	INTRODUCCION	281
6.2	ANALISIS DE LA RESISTENCIA A LA ACCIÓN DEL AGUA	281
6.2.1	Generalidades	281
6.2.2	Resultados	282

6.3	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA EN BRIQUETAS GRANDES	287
6.3.1	Generalidades	287
6.3.2	Resultados	287
6.4	ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL pH	289
6.4.1	Generalidades	289
6.4.2	Resultados	290
6.5	ANÁLISIS DE LA VARIACION DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA	292
6.5.1	Generalidades	292
6.5.2	Resultados	292
7.	CONCLUSIONES	295
8.	RECOMENDACIONES	300
	BIBLIOGRAFÍA	301

0. INTRODUCCION

El desarrollo tecnológico que ha alcanzado la industria de la construcción ha permitido el desarrollo de nuevos productos que permitan el mejor aprovechamiento de los recursos existentes y una considerable disminución en los costos de construcción y de los impactos ambientales de los diferentes proyectos.

Las entidades del orden nacional e internacional encargadas del desarrollo de proyectos viales propenden por la implementación de nuevas tecnologías que permitan la disminución de los costos de los pavimentos y los daños ambientales que provocan la construcción de nuevas vías al ecosistema, para lo cual promueven el desarrollo de productos que permitan el aprovechamiento de los recursos naturales para incorporarlos a las estructuras de pavimento y el mejoramiento de los diferentes materiales con el fin de disminuir los espesores de las diferentes capas de la estructura de pavimento.

En los últimos años se ha vuelto común a nivel mundial el uso de suelos estabilizados para la construcción de estructuras de pavimentos, lo anterior ante la escasez de materiales granulares que puedan aportar la resistencia requerida. El empleo de los suelos finos estabilizados permite disminuir los espesores de las capas lo cual también implica una rebaja en los costos de construcción y en el impacto ambiental que se causa durante la construcción de grandes proyectos viales.

En Colombia el empleo de los suelos estabilizados ha sido muy común en regiones como la Costa Atlántica y los Llanos orientales debido a que en estas zonas los suelos son en su mayoría finos y casi no existen fuentes de materiales granulares para la construcción de grandes proyectos viales, razón por la cual ha sido necesario desarrollar diversas técnicas de estabilización de los suelos finos con el fin de poder construir los proyectos viales a costos razonables y acordes con la situación del país.

Actualmente en Colombia la utilización de los polímeros en la estabilización de suelos dentro de los proyectos viales se viene haciendo de una manera empírica que no permiten predecir de una manera segura el comportamiento que estos materiales van a presentar cuando son exigidos por las cargas de tránsito y los efectos del medio ambiente. Además no se ha determinado su verdadero aporte a las estructuras de pavimento y la forma como deben ser consideradas las capas formadas por estos materiales dentro del diseño de un pavimento. Los ingenieros que realizan los trabajos de estabilización de suelos finos no tienen los debidos cuidados durante la construcción ya que desconocen el proceso constructivo adecuado afectando de esta manera la calidad de los trabajos.

A nivel internacional se han realizado diversas investigaciones que han llevado al desarrollo de diversos polímeros que permiten un mejoramiento de las propiedades de los suelos finos, algunos de los cuales han sido importados al país pero tienen un alto costo en el mercado local lo que hace que su utilización sea económicamente inviable.

La industria nacional ha desarrollado una serie de productos poliméricos que por sus características físico – químicas pueden ser utilizadas para el mejoramiento de suelos finos, pero su verdadero beneficio no ha sido demostrado.

Con el presente trabajo se busca avanzar en el proceso de introducir una nueva tecnología para el mejoramiento de suelos determinando con base en el análisis de las propiedades físicas de los suelos y de la mezcla suelo estabilizante la viabilidad técnica y económica de la utilización de algunos polímeros en el mejoramiento de suelos finos.

Es importante tomar en cuenta que para el desarrollo del presente estudio solo se tuvieron en cuenta cinco tipos de suelos diferentes y el uso de los productos en otro tipo de suelo deberá ser estudiado cuidadosamente con el fin de determinar si los productos utilizados pueden dar resultados similares en ellos ya que las reacciones presentadas dependen de las características físico químicas de los suelos.

0.1. OBJETIVOS

0.1.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de los suelos finos estabilizados con ligantes hidráulicos ante la acción de diversos estabilizantes no convencionales.

0.1.2. Objetivos específicos

- Determinar si la adición de productos químicos no convencionales permite mejorar el comportamiento de los suelos estabilizados con cal o cemento.
- Determinar las propiedades físicas de los suelos finos sin estabilizar.
- Determinar las propiedades químicas de los suelos finos sin estabilizar.
- Analizar el efecto de los diferentes estabilizantes empleados sobre las propiedades físicas del suelo estudiados.

- Determinar el producto más adecuado para la estabilización de los suelos finos estudiados.

0.2. JUSTIFICACION

Actualmente se observa un enorme deterioro en la malla vial tanto a nivel nacional, como regional, lo cual hace necesario que se realicen enormes inversiones para su rehabilitación y/o reconstrucción según sea el caso. Ante la escasez de recursos, debido a la difícil situación económica que afronta el país, es necesario desarrollar e implementar metodologías que permitan disminuir al máximo los costos de construcción y/o rehabilitación de los pavimentos. La estabilización de los suelos finos es una de las principales actividades a considerar en este proceso.

Actualmente las entidades nacionales encargadas de la administración de la malla vial nacional, el Instituto Nacional de Vías y Fondo Nacional de Caminos Vecinales, están implementando políticas tendientes a promover la utilización de suelos estabilizados tanto en la rehabilitación de las carreteras existentes como para la construcción de pavimentos y/o afirmados nuevos.

En muchas zonas del país la falta de materiales pétreos o la escasez de los mismos ha obligado a la utilización de los suelos finos estabilizados con cal, cemento, y diversos productos químicos. El comportamiento de estos estabilizantes no ha sido debidamente estudiado con excepción del cemento, cuya utilización es confiable y su comportamiento altamente conocido, pero presenta el inconveniente de tener un alto costo haciendo de esta manera muy difícil adelantar proyectos de pavimentación en esas regiones del país.

En Popayán el empleo de los suelos estabilizados ha sido muy escaso por no decir nulo, y su utilización se ha limitado a unos escasos proyectos de investigación desarrollados por La Universidad del Cauca y algunas obras aisladas que se construyeron más por el ánimo innovador de algunos profesionales y no por una política seria encaminada al desarrollo e implementación de una nueva tecnología.

Debido al tipo de flota vehicular y los volúmenes de tránsito que circulan por la malla vial de Popayán, y teniendo en cuenta las características físico mecánicas de los suelos finos que se encuentran en la ciudad, si se logra un aumento considerable en la capacidad de soporte de los suelos finos se minimizarían las estructuras de pavimento necesarias. Esto repercutiría en la disminución de los costos de construcción así como el impacto ambiental y social que podría representar la reconstrucción de la malla vial de la ciudad.

Los altos costos que presentan las estabilizaciones realizadas con cemento, hacen en algunas ocasiones la utilización de esta alternativa no viable económicamente. Pero existen productos como son los polímeros elastómeros y/o plastómeros que podrían en un momento dado disminuir los costos de estabilizaciones poniéndolas al alcance de los presupuestos nacional, departamental o municipal.

El uso de suelos finos estabilizados para el mejoramiento de las subrasante, permite la optimización del empleo de materiales granulares. Esto permite disminuir los daños ambientales provocados por la explotación inadecuada de las fuentes de materiales, en zonas montañosas y ríos, además se reducir el traslado de suelos finos hacia botaderos.

0.3. METODOLOGIA

Para la elaboración del presente estudio se empleó la siguiente metodología:

- A. Investigación bibliográfica mediante el empleo de bibliotecas, internet y textos suministrados por el Ingeniero Director del proyecto de los siguientes temas:
 - ✓ Mecánica de suelos enfocada al comportamiento de los suelos finos.
 - ✓ Conceptos básicos de polímeros.
 - ✓ Química de suelos.
 - ✓ Empleo de la cal en la estabilización de suelos.
 - ✓ Empleo del cemento en la estabilización de suelos.
 - ✓ Empleo de polímeros en la estabilización de suelos.
 - ✓ Empleo de productos químicos en la estabilización de suelos.
- B. Recolección de muestras de diferentes tipos de suelos con el fin de seleccionar aquellos a ser empleados en la investigación.
- C. Selección de cuatro (4) suelos para la realización de ensayos de clasificación física de acuerdo con la inspección visual teniendo cuidado de seleccionar suelos diferentes.
- D. Determinación de las propiedades físico–mecánicas de los suelos mediante la realización de los siguientes ensayos:
 - ✓ Gradación mediante tamizado (INV E – 123).
 - ✓ Determinación del tamaño de las partículas que pasan el tamiz No. 200 mediante la prueba del hidrómetro (INV E – 124).
 - ✓ Determinación de los límites de consistencia (INV E – 125 y INV E – 126).

- ✓ Determinación del índice de plasticidad (INV E – 126).
 - ✓ Clasificación de los suelos mediante el sistema unificado de clasificación de suelos.
 - ✓ Determinación de la humedad natural del suelo (INV E – 122).
 - ✓ Determinación de la capacidad de soporte del suelo mediante la medición de la resistencia a la compresión inconfiada.
- E. Determinación de la composición química y mineralógica de los suelos mediante la realización de las siguientes pruebas:
- ✓ Medición del pH.
 - ✓ Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.
 - ✓ Determinación de la presencia de Carbonatos.
 - ✓ Prueba del Grumo.
 - ✓ Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro.
 - ✓ Caracterización química de los suelos.
 - ✓ Espectroscopía Infrarroja.
- F. Análisis del efecto de la cal en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de cal.
- G. Análisis del efecto del cemento portlant en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de cemento.
- H. Análisis del efecto del silicato de sodio (Na_2SiO_3) en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de silicato de sodio.
- I. Análisis del efecto del dicloruro de calcio (CaCl_2) en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de dicloruro de calcio.
- J. Análisis del efecto del bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 - 10\text{H}_2\text{O}$) en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de bórax.
- K. Selección de dos suelos para realizar mayores análisis, de acuerdo a los resultados presentados en los pasos anteriores.
- L. Análisis del efecto del “texilán 553” en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de “texilán 553”.

- M. Análisis del efecto del “construcril 1662” en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con diferentes porcentajes de “construcril 1662”
- N. Análisis del efecto de la mezcla de diversos estabilizantes en el comportamiento del suelo mediante la realización de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada.
- O. Selección de los porcentajes de estabilizante que presentaron mejor comportamiento.
- P. Determinación del efecto de los estabilizantes en el comportamiento físico–mecánico del suelo mediante la realización de las siguientes pruebas:
- ✓ Determinación de los límites de consistencia.
 - ✓ Determinación del índice de plasticidad.
 - ✓ Determinación de la capacidad del suelo mediante la medición de la resistencia a la compresión inconfiada.
- Q. Determinación del efecto de los estabilizantes en el comportamiento químico del suelo mediante la medición del pH.
- R. Elaboración de informe final.

1. MARCO TEORICO

1.1. GENERALIDADES

El suelo es un elemento fundamental en la Ingeniería, siendo sus propiedades físicas, químicas y mecánicas fundamentales dentro de los procesos de diseño y construcción de las diferentes obras civiles, pero las condiciones naturales del suelo no siempre son las adecuadas para lograr que las obras se puedan ejecutar garantizando la calidad de las mismas a unos costos razonables y con la durabilidad deseada, por lo cual es necesario realizar acciones con el fin de conseguir tan deseables características.

A través de la historia el hombre ha venido tomando diversas medidas con el fin de solucionar los problemas y riesgos que el suelo en su estado natural, al principio se elegía otros sitios para las construcciones o se sustituía el suelo por uno más adecuado, pero con el paso de los años los diferentes desarrollos tecnológicos han ido exigiendo a la construcción de obras con mejores especificaciones lo cual ha obligado a la búsqueda de nuevas alternativas para superar los problemas generados por la mala calidad del suelo en su estado natural.

Hoy en día los Ingenieros al momento de diseñar o construir una obra donde existan suelos cuyas propiedades no sean las adecuadas optan por la utilización de las siguientes alternativas que permitan garantizar la calidad, durabilidad y economía de las diferentes obras:

1. Aceptar el suelo en su estado natural, estudiar sus propiedades y considerarlas en el diseño de las estructuras y posteriormente en la construcción de las mismas.
2. Remover total o parcialmente el suelo natural hasta profundidades que no afecten la estabilidad de la estructura y reemplazarlo por un suelo de propiedades adecuadas para la construcción.
3. Mejorar el suelo en su estado natural, lo cual consiste en la aplicación de una o varias tecnologías que permitan adecuar sus propiedades a las condiciones del proyecto.

Esta última alternativa es la que habitualmente se conoce como la estabilización del suelo y bajo la cual partiendo de un conocimiento adecuado de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material se le aplican métodos que van desde la manipulación del material, el secado hasta la adición de compuestos

que permitan mejorar su comportamiento dentro de los diversos proyectos de ingeniería.

1.1.1. Definiciones

En la literatura se encuentran muchas y diversas definiciones para la estabilización de suelos igualmente válidas, entre las más importantes se encuentran:

“Estabilización es la modificación de cualquier propiedad del suelo para mejorar su propiedad ingenieril” Lambe T. William, Whitman Robert V. Mecánica de Suelos.

“Conjunto de procesos físicos, químicos y físico – químicos, tendientes a modificar las propiedades de los suelos que interesan para un determinado uso en ingeniería, haciendo que el material de suelo sea adecuado para la utilización prevista reemplazando a otros no disponibles o más costosos” Pocino E. Hugo et al. Caracterización de los materiales tratados con ligantes hidráulicos y su aplicación al dimensionamiento de pavimentos flexibles. U.N.R. Argentina. 1980.

La estabilización es un tratamiento que se aplica a los suelos, a los materiales granulares o capas de subrasante, adicionándoles un ligante que puede ser o no bituminoso (productos químicos, aceites, asfalto, emulsión asfáltica, cal, cemento) para mejorar sus características mecánicas, especialmente la capacidad portante, resistencia a los agentes atmosféricos, estabilidad volumétrica, etc” Figueroa Sofía, Reyes Freddy, Estabilización con Cal y Cemento.

1.1.2. Propiedades de los suelos a mejorar

Entre las propiedades de los suelos más importantes a mejorar se encuentran las siguientes:

➤ Estabilidad volumétrica¹

Algunas arcillas presentan variaciones volumétricas al presentarse cambios de humedad, este fenómeno es más pronunciado en suelos de zonas áridas y semiáridas o donde la Montmorillonita, Bentonita o los minerales arcillosos más activos no han sido suficientemente meteorizados.

Las presiones de expansión o contracción que se desarrollan debido a los cambios volumétricos deben ser controladas por que de lo contrario podrán provocar deformaciones en la estructuras de pavimento, inclinación de postes,

¹ Fernandez Loaiza, Carlos. MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS, Editorial Limusa, México, 1982

fisuración de muros, rotura de tuberías de drenaje, y en general daños en las estructuras que aunque pueden no llegar a colapso de las mismas si ocasionan daños que afectan significativamente su funcionamiento. Por lo anterior es necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado para reducir su actividad.

Entre las soluciones más empleadas para evitar los cambios volumétricos en los suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeable, apoyar la estructuras a profundidades tales que no se registre variación estacionaria en la humedad y controlar el flujo del agua a través de la masa arcillosa mediante la utilización de sistemas de filtros y sellados de poros y grietas (Fernández Loaiza, 1982)

La reducción de la permeabilidad de las arcillas es una forma de reducir la velocidad de los cambios volumétricos de los suelos expansivos, lo anterior se puede lograr compactándolos a pesos volumétricos más altos, pero debe tenerse en cuenta que la humedad de compactación juega un papel muy importante en el fenómeno de los cambios volumétricos, dado que si bien es cierto que una arcilla altamente densificada ofrece una alta impermeabilización, presenta también el problema que una vez dicha arcilla se sature alcanzara presiones de expansión mayores en la medida que se haya compactado con menor humedad, por tanto es conveniente que cuando se adopte este tipo de soluciones se tengan en cuenta las condiciones climatológicas e hidrológicas de la región con el fin de garantizar que el suelo no se sature durante las lluvias y se debe compactar en la rama humedad.

La modificación de los suelos arcillosos también puede usarse como herramienta para controlar los cambios volumétricos, esto consiste en modificar el material con el fin de transformarlo en una masa rígida o granular cuyas partículas estén suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de las arcillas, lo cual puede lograrse por medio de procedimientos químicos o térmicos. En estos casos debe tenerse en cuenta que si la capa a estabilizar es pequeña el suelo subyacente es todavía susceptible de expandirse, pero esos movimientos podrán ser controlados siempre y cuando la capa estabilizada se mueva de forma uniforme.

También se ha tratado de transformar grandes capas de arcilla en una masa rígida mediante la inyección de productos químicos pero con el inconveniente del bajo flujo que presentan estos materiales a través de la masa del suelo, debido a la baja permeabilidad de las arcillas.

➤ Resistencia Mecánica

La resistencia de los suelos es una de las propiedades mecánicas más importantes en la ingeniería, los suelos como la mayoría de los materiales sólidos de la naturaleza están sometidos a esfuerzos de compresión, tracción o tensión y esfuerzos cortantes, y la falla del material se produce cuando éste es sometido a una combinación de estados de esfuerzos tal que provoca la separación del mismo.

En una masa de suelo debidamente confinada la resistencia a la compresión pura es alta y por ende no tiene mucha importancia, por esto, en la mayoría de los problemas de ingeniería la resistencia a la falla por cortante debe ser considerada por ser esta mucho menor.

La resistencia al corte es el parámetro utilizado para la evaluación de problemas como la estabilidad de taludes, la capacidad de carga admisible para una cimentación, el empuje del suelo contra un muro de contención, etc.

La resistencia de los suelos finos como limos y arcillas esta directamente relacionada con su contenido de humedad, siendo esta considerablemente más baja cuando presentan un mayor contenido de agua. Para algunos tipos de suelo y obras de ingeniería, a veces resulta más importante que la resistencia, la baja deformabilidad bajo la acción de las cargas, como en el caso de los suelos resilientes.

El comportamiento de la resistencia de los diferentes tipos de suelo es muy variable y depende del tipo de suelo, la composición mineralógica, la forma y tamaño de las partículas, su contenido de humedad (para suelos finos), su historial de esfuerzos, el grado de compactación, la presión de confinamiento, etc.

La resistencia del suelo debe ser determinada teniendo en cuenta las condiciones de trabajo y la manera como se va a utilizar el mismo, empleando para tal efecto métodos que representen de una manera veraz los diferentes parámetros que puedan afectar el material, buscando siempre que exista similitud entre las condiciones representadas en laboratorio y las que el suelo va a presentar una vez se encuentra en sitio.

La resistencia de un suelo puede ser incrementada de diversas formas como variando su contenido de humedad, incrementando su grado de compactación, adicionando agentes estabilizantes, colocando precargas temporales para aumentar la compacidad, etc.

Algunas veces es muy difícil tratar de incrementar la resistencia de un suelo como es el caso de aquellos que tienen un alto contenido de materia orgánica, del orden del 10%, ya que ésta inhibe la acción de los agentes estabilizantes. Por esta razón

para la adición de agentes estabilizantes es necesario conocer las características físico-químicas del suelo y su composición mineralógica, además tener claro el resultados deseado.

➤ **Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad que tienen los suelos de permitir el paso de un fluido a través de sus vacíos, esta propiedad es importante para la solución de dos problemas básicos como son: la disipación de la presión de poros y el relacionado con el flujo de agua a través del suelo ya que estos problemas pueden originar serios inconvenientes en lo que al comportamiento de la masa de suelo se refiere.

La permeabilidad de un suelo esta relacionada con la compactación del mismo y el tipo de suelo, es así como, si se compacta una arcilla con humedades bajas se obtiene finalmente una alta permeabilidad debido a que los grumos no se disgregan resistiendo éstos el esfuerzo de compactación y permitiendo de esta manera que se formen una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación menor será la permeabilidad obtenida debido a que la arcilla presenta una mayor capacidad de deformarse permitiendo un mejor acomodo de las partículas lo que genera que el volumen de vacíos sea menor.

Según Fernández Loaiza (1982) cuando los suelos finos se compactan con una humedad mayor a la óptima estos presentan un leve incremento en la permeabilidad entre mayor sea la humedad, lo anterior es debido a que una mayor humedad permite que el agua ocupe un volumen adicional dejando una mayor cantidad de vacíos.

La energía de compactación también afecta la permeabilidad del suelo dado, ya que a mayor energía se genera un mejor acomodamiento de las partículas disminuyendo de esta manera el volumen de vacíos.

La permeabilidad de los suelos puede ser reducida mediante la inyección de lechadas, pero sin embargo, esto solo consigue disminuir la permeabilidad del suelo dado que no sellan completamente los poros. Existen algunos productos como defloculantes que permiten lograr en los suelos una perfecta impermeabilidad, otros productos como son los aditivos químicos líquidos y las emulsiones asfálticas hacen que el suelo se vuelva parcialmente hidrofóbico, pero esto hace que el suelo pierda su cohesión parcial o totalmente.

➤ **Durabilidad**

La durabilidad es una condición muy deseable de los suelos estabilizados, ésta se define como la resistencia a los procesos de intemperización, erosión y abrasión.

La durabilidad en las estructuras de viales está relacionada con las capas superficiales de los pavimentos en la formación de baches o disgregaciones, erosiones en los taludes y cambios en la textura de los agregados de las carpetas, entre otros. Ocasionalmente se presentan erosiones en las capas internas del pavimento debido a la permeabilidad y a la baja resistencia que estas presenta a los diferentes factores climáticos que afectan la durabilidad.

La baja durabilidad de las diferentes capas de la estructura de pavimento tiene altas repercusiones en los costos de mantenimiento de las vías. Cuando se presenta baja durabilidad en suelos estabilizados se debe generalmente a deficiencias en los diseños como puede ser la aplicación del estabilizante inadecuado o la utilización de cantidades inadecuadas de estabilizante.

➤ **Compresibilidad**

Los cambios volumétricos o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues estos modifican otras propiedades como son la permeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante y provocan deformaciones.

Es así en el caso de arcillas saturadas sin posibilidad de drenaje que son sometidas a esfuerzo, este es tomado por el agua, pero al permitir el drenaje los esfuerzos son transmitidos gradualmente a la estructura del suelo produciéndose una compresión de dicha estructura lo que se conoce como consolidación.

La compresibilidad del suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de algunos factores importantes como el historial de cargas, el tiempo de aplicación de la carga, naturaleza química del líquido intersticial, entre otros.

Las características de compresibilidad del suelo se pueden modificar mediante procesos de compactación, drenaje o mediante la adición de diferentes agentes estabilizantes.

➤ **Resiliencia**

La resiliencia es la capacidad que tienen los suelos de recuperarse de las deformaciones sufridas a causas de la aplicación de cargas, pero a diferencia de la elasticidad, esta recuperación se realiza de una forma muy retardada.

Esta propiedad es poco deseable y se presenta sobre todo en los suelos limosos, provocando en las estructuras de pavimento agrietamiento.

➤ **Manejabilidad**

La manejabilidad es la capacidad que tiene el suelo de dejarse moldear, excavar, transportar, compactar y en general trabajar, en la ingeniería ésta es una propiedad muy deseable en los suelos.

Las arcillas presentan un bajo grado de manejabilidad que resulta indeseable para poder trabajarlas generando enormes costos durante los procesos constructivos que podrían disminuirse recurriendo a los procesos de estabilización mediante la adición de diversos agentes estabilizantes.

1.2. PROCEDIMIENTOS PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS

Los métodos para el mejoramiento de suelos pueden clasificarse de diversas formas, de acuerdo con la naturaleza del proceso aplicado, el material adicionado, los resultados deseados. De acuerdo a los procesos empleados existen las estabilizaciones mecánica, física, físico-química, química, térmica, eléctrica, electroquímica, entre otros.

A continuación se tratan algunos de los métodos más utilizados para la estabilización de los suelo.

1.2.1. Estabilización mecánica

La Estabilización Mecánica de los suelos consiste en el mejoramiento de sus propiedades mediante la aplicación de métodos mecánicos que permitan conseguir un adecuado comportamiento de la estructura de suelo en las condiciones de trabajo. Entre los métodos de estabilización mecánica más conocidos se encuentran los siguientes:

➤ **Compactación del suelo**

Introducción

Cualquier depósito de suelo puede ser compactado mediante la utilización de equipo pesado con el fin de aumentar su compacidad.

La compactación de suelos in situ se suele limitar a los centímetros superiores del terreno. Las arenas pueden compactarse a veces con rodillos hasta una profundidad de 1.00 o 1.50 metros. Sin embargo, la compactación se suele hacer por capas sucesivas de suelo.

Durante la primera mitad del siglo 20 se realizaron grandes desarrollos en cuanto a equipos de compactación se refiere, aumentando los pesos de la maquinaria disponible de 2 toneladas hasta 180 toneladas.

Se han desarrollado diferentes tipos de rodillos entre los que se encuentran los de llanta lisa, los neumáticos, los pata de cabra y los vibratorios. En los suelos cohesivos puede lograrse altas densidades con la mayoría de los tipos de rodillo, sin embargo los rodillos vibratorios son los menos eficaces siendo los mejores los neumáticos con elevadas presiones de inflado (hasta 10 Kg/cm²). Si los suelos no presentan cohesión se pueden emplear tanto rodillos vibratorios como neumáticos para obtener elevadas compactaciones.

El control técnico de la compactación es supremamente importante para obtener las propiedades deseadas en el suelo y especial para conseguir un material razonablemente uniforme. Según sea el caso se debe controlar el peso específico, la humedad y las características de clasificación con cierta frecuencia.

Proceso constructivo

Durante la compactación de un suelo in situ es recomendable realizar los siguientes pasos:

1. Preparar la superficie de construcción.
2. Elección del suelo de préstamo adecuado.
3. Carga, transporte a obra y vertido del suelo de préstamo.
4. Extendido del suelo el cual debe realizarse por capas cuyo espesor depende del tipo de suelo y de la maquinaria que se va a emplear para la compactación.
5. Adición de agua para alcanzar la humedad de compactación. En algunos casos puede ser necesario secar un poco el material lo cual se consigue mediante un proceso de aireo rotándolo de un lado a otro con el equipo adecuado.
6. Mezclado del suelo con el fin de conseguir una adecuada uniformidad.
7. Extendido del material.
8. Compactación del suelo de acuerdo al proceso especificado o hasta obtener las propiedades mecánicas deseadas.

El anterior proceso debe repetirse en todas las capas hasta alcanzar el nivel deseado, es importante que se realice un adecuado control de compactación en todos los niveles con el fin de que el funcionamiento de la masa de suelo sea el adecuado dentro de la estructura.

Influencia de la compactación sobre la estructura del suelo

La compactación tiene diferentes efectos sobre la estructura del suelo dependiendo de la humedad y la energía de compactación es así que para una energía de compactación y un peso específico seco dados, el suelo tiende a estar más floculado cuando es compactado en el lado seco de la curva, pero el aumento de la energía de compactación en un mismo suelo a la misma humedad de compactación tiende a dispersar el suelo especialmente si la compactación se realiza del lado seco de la curva.

Si se aumenta la humedad de compactación en un suelo se tiende a aumentar las repulsiones entre partículas, permitiendo así una distribución más ordenada de las mismas con una cierta cantidad de energía de compactación. El aumento de la energía de compactación de un suelo a una determinada humedad tiende a ordenar las partículas con una distribución más o menos paralela.

Influencia de la compactación sobre las propiedades mecánicas de los suelos

La naturaleza y la magnitud de la compactación en un suelo fino tiene una gran influencia sobre su comportamiento ingenieril.

Resistencia

La compactación de suelos con humedades menores a la óptima permite alcanzar mayores resistencias que si se realiza con humedades mayores a la óptima.

Permeabilidad

El aumento de la energía de compactación reduce la permeabilidad ya que se aumenta el peso específico seco y por lo tanto se reducen los vacíos disponibles para el flujo de agua.

El aumento de la humedad de amasado da una reducción de la permeabilidad por el lado seco de la curva, pero se presenta un ligero aumento de la permeabilidad si la compactación se realiza por el lado húmedo de la curva.

Compresibilidad

Según LAMBE, una arcilla saturada que se compacte al mismo peso específico seco con una baja energía de compactación será más compresible si la humedad de compactación se encuentra en el lado húmedo de la curva, pero si la

compactación es realizada con una energía alta la muestra será más compresible si esta se realiza con una humedad menor a la óptima.

Relación esfuerzo–deformación

Las arcillas compactadas con humedades menores a las óptimas tienden a ser más rígidas y resistentes que las compactadas con humedades superiores a las óptimas.

➤ Precarga

Este método consiste en la colocación de una carga superficial antes de iniciar la construcción con el fin de preconsolidar el terreno de cimentación, con este procedimiento se puede conseguir transformar un suelo normalmente consolidado a otro con todas las características deseables de un suelo sobreconsolidado, es decir una menor compresibilidad y mayor resistencia aumentando con esto la capacidad de carga del terreno y disminuyendo los asentamientos.

Este método constituye una herramienta muy valiosa para el ingeniero y puede resultar muy útil cuando se presentan las siguientes situaciones:

Cuando se cuenta con un suelo fácilmente disponible para utilizarlo como precarga.

El terreno de cimentación drena rápidamente de forma que el tiempo requerido de precarga es relativamente corto.

➤ Drenaje

El drenaje es un método de mejora del terreno con el cual se consigue disminuir la cantidad y/o presión intersticial del agua, con el drenaje usualmente se consigue un aumento de la compacidad del suelo.

Es muy conocido el efecto que tiene el agua sobre las propiedades ingenieriles de los suelos finos, el agua con flujo ascensional puede dar lugar a sifonamiento, reducción de los esfuerzos efectivos debido al aumento de la presión intersticial, por estas razones resulta muy deseable y en algunos casos imprescindible eliminar el agua intersticial del terreno o por lo menos reducir su presión.

El drenaje puede utilizarse como medida provisional para permitir la construcción de una obra o como medida permanente para garantizar la durabilidad de la obra.

Existen muchos métodos de drenaje, entre los más conocidos se encuentran:

1. Drenes verticales, usados para la estabilización de terraplenes.
2. Drenes horizontales, usados para la estabilización de taludes naturales.
3. Zanjas, son muy comunes en la construcción de carreteras.
4. Pozos–dren, empleados para excavaciones.

1.2.2. Estabilización física

La estabilización física de los suelos consiste en el mejoramiento de su comportamiento mediante la modificación de sus propiedades físicas como son la granulometría o mediante la colocación de elementos de refuerzo como son los geotextiles.

➤ Estabilización de suelos mediante el mezclado con otros suelos

La estabilidad de suelos que contengan partículas finas y gruesas depende de la distribución del tamaño de las partículas, su peso volumétrico, la fricción entre partículas y la cohesión.

Uno de los factores que mayor influencia tiene sobre la resistencia de un suelo grueso es la distribución granulométrica de las partículas de suelo, sin menospreciar la forma y la textura de las mismas.

Un suelo que contenga pocos o ningún fino y que presente una buena sucesión de tamaños obtiene su estabilidad gracias al contacto directo entre partículas, es permeable y no susceptible a la acción de las heladas, sin embargo, este material presenta problemas de trabajabilidad durante la construcción debido a su naturaleza no cohesiva.

Un suelo que presente una cantidad adecuada de finos para llenar los vacíos entre partículas obtendrá su resistencia del contacto directo entre partículas gruesas pero presentará una mejor distribución de los esfuerzos, el peso volumétrico es mayor, la permeabilidad disminuye y puede ser susceptible a la acción de las heladas, este material presenta algunos problemas de compactación pero es ideal desde el punto de vista de estabilidad debido a que tiene una resistencia al esfuerzo cortante relativamente alto para el material confinado o sin confinar.

Un suelo que contenga una gran cantidad de finos deberá su estabilidad al comportamiento de las partículas finas debido a que no se presentara contacto entre partículas gruesas, presentará un peso volumétrico generalmente bajo, resulta prácticamente impermeable y susceptible a la acción de las heladas. Adicionalmente su estabilidad se ve gravemente afectada con los cambios de humedad.

Algunas investigaciones realizadas han demostrado que la inclusión de finos en materiales gruesos puede resultar nociva si esto no son controlados en cuanto a

calidad y cantidad de los finos, dado que su presencia en exceso o con plasticidad puede provocar la pérdida de resistencia y el aumento de la deformabilidad de las capas lo cual resulta indeseable.

En la practica los agregados no se acomodan a una perfecta sucesión de tamaños sino que presentan la tendencia a formar anhuacalamiento lo que afecta su comportamiento haciendo necesario modificar su granulometría mediante la mezcla con otro suelo que permita lograr el máximo peso volumétrico, teniendo en cuenta que el contenido de finos debe dosificarse con la resistencia.

El método de estabilización de suelos mediante el mezclado con otros suelos es una practica muy común y es particularmente usada en los proyectos viales para mejorar materiales granulares consiguiendo de una manera sencilla y a un costo razonable mejorar las propiedades de los materiales locales para poder utilizarlos como sub-base, base o agregados para la producción de mezclas asfálticas.

1.2.3. Estabilización físico-química

➤ Estabilización de suelos finos con cal

• Introducción²

El uso de la cal para la estabilización de suelos finos es una práctica que tiene más de 5000 años siendo usada esta técnica para la construcción de pirámides en el Tibet y para la construcción de caminos en la China e India, pero en esa época los procesos se realizaban de una manera empírica y solo hasta finales de los años 40 en los Estados Unidos se desarrollaron técnicas para la realización de pruebas mecánicas de laboratorio para la evaluación de mezclas de suelo – cal. En los años 50 se construyeron en ese país miles de millas de carreteras estatales e importantes aeropuertos empleando esta técnica. En el Reino Unido fueron realizados varios trabajos de laboratorio y algunos trabajos de campo en los años 50 y 60, pero esta técnica solamente fue ampliamente utilizada desde finales de los años 70 y principios de los 80 lo cual arrojó como resultado un método para la estabilización de subrasante con cal que fue incluido en las especificaciones del Departamento de Transporte para Trabajos en Carreteras publicadas en 1986 y se mantuvieron en la revisión de dichas especificaciones publicadas en 1991.

Actualmente la estabilización con cal es una técnica ampliamente utilizada en el Reino Unido, en el año de 1995 se trataron con cal aproximadamente medio millón

² H.M. Greaves BSc (Hons), Ceng, MICE. Stabilisation Services Manager, Buxton Lime Industries. Lime Stabilisation. Thomas Telford, London, 1996.

de metros cúbicos, aunque se han presentado algunos pequeños inconvenientes. En general el funcionamiento de los suelos estabilizados con cal ha sido bueno.

La experiencia muestra que la utilización de la cal para la estabilización de suelos finos no solamente representa ahorros en los costos de construcción de carreteras y aeropuertos, sino que además, se puede observar que las obras permanecen en buen estado durante 25 o 30 años con un mínimo mantenimiento.

En el año de 1995 el Departamento del Transporte del Reino Unido incorporó la estabilización de suelos con cal en el Manual de Diseño para Caminos y Puentes, lo cual se constituye en el documento más autorizado para el Diseño y Construcción de Capas Estabilizadas con Cal.

- **Tipo de cal utilizada en el proceso de estabilización de suelos finos**

La estabilización con cal es conseguida con óxido de calcio (cal viva) o con hidróxido de calcio (cal apagada o cal hidratada). Los efectos de la estabilización dependen de la reacción que se presente entre la cal y los minerales arcillosos, entre los principales efectos se encuentran:

- ◆ Incremento en la resistencia al corte y la capacidad portante del suelo.
- ◆ Reducción en la susceptibilidad a la expansión y compresión de los suelos.
- ◆ Mejora en la resistencia al tráfico y al agua.
- ◆ Reducción en el contenido de humedad.
- ◆ Mejora en la trabajabilidad y características de compactación.
- ◆ Disminución de la plasticidad

Aunque la cal viva o la cal apagada pueden ser usadas en la estabilización de suelos la cal viva aventaja enormemente a la cal hidratada debido a que esta presenta mayor cantidad de cal efectiva por unidad de masa, presenta una mayor densidad lo que representa menores costos en transporte, produce un menor número de partículas finas volátiles, genera más calor de hidratación produciendo una mayor reducción en el contenido de humedad por evaporación e hidratación y acelera el aumento de la resistencia del suelo, pero la cal apagada presenta una mejor manejabilidad.

- **Mecanismo de estabilización**

La adición de cal a los suelos finos produce las siguientes modificaciones:

Secado por absorción y evaporación: con la adición de cal viva, la reducción del contenido de humedad del suelo puede ser sustancial y ocurrir inmediatamente se le adiciona el estabilizante ya que esta toma inmediatamente el 32% de su

propia masa de agua del suelo a su alrededor para formar una cal hidratada y además la reacción de la cal viva es altamente exotérmica y el calor generado causa una mayor pérdida de humedad debido a la evaporación. Adicionalmente es importante tomar en cuenta el aparente secado que se presenta debido a el incremento en el límite plástico.

Mejoramiento o modificación: una vez se le adiciona cal al suelo se presenta una reacción físico – química debido al intercambio catiónico que se produce entre los minerales arcillosos del suelo y la cal, lo anterior genera que se forme un nuevo material con una mejora en las características de plasticidad y trabajabilidad. La adición de cal produce un significativo incremento en el límite plástico del suelo y el límite líquido se mantiene más o menos constante lo cual se traduce en una reducción del índice de plasticidad, esto representa claramente una mejora en la trabajabilidad y transitabilidad del suelo.

Pierre y otros en 1995 encontraron que los suelos estabilizados con cal se comportan de una manera muy diferente a la mayoría de los suelos naturales y presentan características de plasticidad completamente diferentes al suelo original sin estabilizar. Se recomienda que durante la construcción se use la rama húmeda de la curva con el fin de asegurar una adecuada compactación del suelo.

Estabilización: los minerales arcillosos tienen la habilidad de reaccionar con la cal para producir agentes cementantes. Si al suelo se le adiciona una cantidad tal de cal que permita elevar el pH del suelo a valores por encima de 12, produce un incremento de la solubilidad de los silicatos y aluminatos que reaccionan con el calcio del hidróxido de calcio y sílice y con los hidróxidos de aluminato de calcio, produciendo un gel que recubre las partículas del suelo y que eventualmente se cristaliza dentro de los hidratos de silicatos y aluminatos.

Los productos de la cementación son muy similares en composición a los del cemento portland, pero el proceso es relativamente lento por que la cal disponible tiene una difusión lenta por la estructura del suelo y aunque la cementación inicial resulta en una ganancia en resistencia, pero el suelo puede continuar aumentando su capacidad por varios años más, por la reacción puzolánica entre la cal y los minerales de la arcilla.

- **Tipos de suelos adecuados para estabilizar**

Los suelos que contienen significativas cantidades de sílice y alúmina reaccionan adecuadamente con la cal libre, como ocurre con las arcillas y se puede observar también en las cenizas orgánicas pulverizada, escorias del carbón y residuos minerales.

La reacción entre el suelo y la cal es dependiente del contenido de arcilla reactiva, el índice de plasticidad puede ser usado como una medida del contenido de arcilla, generalmente un límite inferior del 10% podría asegurar la susceptibilidad del suelo para que la reacción tome lugar.

Los limos también podrían mejorarse con cal para reducir su susceptibilidad al agua, pero estos podrían no desarrollar mucha ganancia en resistencia, en tales circunstancias podría considerarse su uso como materiales blandos.

- **Efecto de los sulfatos**

Es ampliamente conocido que la presencia de sulfatos en suelos tratados con cal podría causar problemas en la formación de materiales cementantes, ésta es una compleja reacción que depende de un sin número de factores pero básicamente consiste en que su resultado ocupa un mayor volumen que las partes que lo constituyen lo cual se transforma en una disminución de la resistencia y expansión volumétrica, LITTLETON (1995) concluyó que los factores que contribuyen en este proceso son:

- ◆ El tipo y solubilidad de los sulfatos.
- ◆ La cantidad de sulfatos presentes.
- ◆ La cantidad y tamaño de las partículas de arcilla presentes.
- ◆ La habilidad del suelo para absorber agua sobre el nivel en la cual la mezcla fue compactada.

Es importante anotar que el suelo puede adquirir nuevos sulfatos a través del agua de escorrentía una vez la construcción ha sido completada, lo cual hace supremamente importante realizar un análisis del contenido de sulfatos del agua del suelo durante la etapa de la investigación en sitio.

Como la habilidad del agua de penetrar en suelos estabilizados es altamente dependiente de la permeabilidad y el grado de compactación resulta importante que los suelos estabilizados se compacten a niveles que no permitan que el porcentaje de vacíos llenos de aire supere el 5% y se preste especial atención al contenido de humedad durante la compactación con el fin de asegurar que esta sea durable.

- **Usos de la estabilización de suelos con cal**

La estabilización con cal podría ser usada en los siguientes casos:

- ◆ Cuando el material en estado natural no se puede emplear debido a su alta humedad o plasticidad.
- ◆ Cuando sea necesario mejorar las propiedades de trabajabilidad y compactación del suelo.
- ◆ Cuando se requiera un incremento en la resistencia y estabilidad.
- ◆ Cuando sea necesario evitar el bote de materiales.
- ◆ Cuando se requiera que el suelo original tenga una calidad igual o superior a la de una sub-base granular.
- ◆ Cuando sean necesarios trabajos temporales y rodaduras provisionales.

La utilización de la estabilización de suelos con cal desde el inicio del proceso de la construcción de una estructura de pavimento trae consigo beneficios considerables, ya que esto permite trabajar con los suelos naturales de tal modo que la sustitución de materiales es eliminada, lo anterior implica unos considerables ahorros en los costos de transporte de materiales, costos de importación de materiales granulares y la disminución de cargas sobre el suelo de fundación.

Como la resistencia de los suelos estabilizados con cal aumenta debido a un incremento en la cohesión y la estabilidad del suelo también aumenta, hace de esta técnica una alternativa adecuada para el tratamiento de suelos propensos a movimiento por asentamientos o expansión, esto quiere decir que puede ser utilizada en aplicaciones estructurales.

- **Construcción de suelos cohesivos estabilizados con cal³**

- ◆ Especificaciones y requerimientos

La estabilización de suelos es llevada a cabo con suelos cohesivos, pero deben hacerse investigaciones minuciosas para determinar la susceptibilidad del suelo a ser estabilizado y las cantidades de cal o cal más cemento que son requeridas para obtener el producto final especificado.

Las especificaciones de suelos estabilizados generalmente están de acuerdo a la cláusula 615 del MCHW 1, pero podría tener algunas modificaciones dependiendo de los requerimientos del producto final y las condiciones de uso, estas incluyen requerimientos tanto para el suelo tratado como para el suelo sin tratar.

³ J. H. SMITH, Consultant to Powerbetter Developments Ltd, Lime Stabilisation. Thomas Telford, London, 1996

✓ **Especificaciones para suelos sin tratar**

Entre las condiciones más importantes que deben cumplir los suelos sin tratar están las siguientes:

1. Gradación: 100% pasa tamiz 75mm
95%-100% pasa tamiz 28 mm
15% - 100% Pasa tamiz # 200
2. Índice de Plasticidad: Mínimo 10% para suelos tratados solamente con cal.
No es necesario límite inferior para tratamiento con cal y cemento
3. Contenido de materia orgánica: Generalmente no mayor del 2% pero podría ser superado si la resistencia y la durabilidad son satisfechas.
4. Contenido de sulfatos totales No mayor al 1%.

✓ **Especificaciones para suelos tratados**

1. Pulverización: Para suelos tratados con cal: 95% pasa el tamiz de 28 mm y el 30% pasa el tamiz 5 mm.

Para suelos tratados con cal y cemento: el 60% pasa el tamiz 5 mm.
2. CBR: Mínimo 15% después de 3 días de curado y 4 días de inmersión.

✓ **Procedimiento de construcción**

La construcción de suelos tratados con cal generalmente es el siguiente:

1. Preparar la superficie de construcción.
2. Escarificar el suelo hasta el espesor de la capa a estabilizar.
3. Pulverizar el suelo con el fin de facilitar el mezclado.
4. Esparcir la cal.
5. Mezclado inicial.

6. Adicionar la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima de compactación.
7. Perfilar y compactar con un rodillo liso o con un rodillo neumático.
8. Dejar madurar la mezcla un periodo de tiempo comprendido entre 1 y 48 horas, pero este tiempo puede ser mayor dependiendo del juicio del ingeniero, ya que puede ser de más de 7 días cuando se trata de suelos muy arcillosos.
9. Mezclado final y adición de agua para conseguir la pulverización y humedad adecuada. Adicionar cemento si es necesario.
10. Compactación final chequeando densidad.
11. Curado y protección.

➤ **Estabilización de suelos finos con cemento portland**

• **Introducción⁴**

Diversas notas históricas hablan sobre la utilización del suelo–cemento. En sus inicios se utilizó de una manera empírica como material para la construcción de bases y pisos, con el tiempo se utilizó en la construcción de caminos sobre todo en lugares donde se presentaban problemas de escasez de buenos materiales, siendo este un acontecimiento que mereció especial atención. Durante la segunda guerra mundial se probó que era posible la construcción de pistas de aterrizaje en aeropuertos utilizando el suelo – cemento con la adecuada tecnología, lo que representó una disminución considerable en los tiempos de construcción .

Para la consolidación definitiva de la utilización del suelo-cemento como tecnología de construcción de pavimentos tuvo gran importancia el notable impulso de los centros de investigación tecnológicos en los países desarrollados como Estados Unidos, la Unión Soviética y Europa lo que permitió obtener las bases científicas necesarias para su adecuada aplicación; adicionalmente el desarrollo del equipo tecnológico para la construcción ha permitido mejorar sus usos y ampliarlo a la construcción de una gran variedad de estructuras.

Se considera que la utilización del suelo–cemento empezó a darse de una manera metódica entre 1910 y 1920, pero su real utilización proviene de muchos años atrás pudiendo considerarse su origen al inicio del uso del cemento cuando los constructores encontraron que al mezclar este producto con el suelo daba un excelente material de construcción. Pero su utilización científica se originó casi simultáneamente en los Estados Unidos e Inglaterra países en los cuales se han construido innumerables obras utilizando esta tecnología con excelentes resultados.

⁴ DE LA FUENTE LAVALLE, Eduardo. suelo – cemento Usos, propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.. México, 1995.

A través de los años el suelo–cemento ha sido utilizado en la construcción de modernos aeropuertos y carreteras en países como Estados Unidos, Unión Soviética, Inglaterra, Alemania, y en general en las naciones más desarrolladas. Actualmente se le han encontrado nuevos y variados usos en obras hidráulicas como son: la construcción de cortinas para presas, protección de costas marítimas y márgenes de ríos, así como en las cimentaciones de ciertas estructuras y la construcción de silos enterrados, gaviones, muros de contención, etc., por lo que es de esperarse que su utilidad y aprovechamiento se incremente cada día más.

- **Usos de la estabilización de suelos con cemento portland**

La estabilización de suelos con cemento se ha utilizado principalmente en las siguientes actividades:

- ◆ Para la construcción de bases y sub-bases de carreteras, calles, aeropuertos y estacionamientos.
- ◆ Construcción de muros de contención.
- ◆ Construcción de pisos en áreas de almacenamiento.
- ◆ Mantenimiento de carreteras, calles, aeropuertos y estacionamientos.
- ◆ Construcción de balastos y sub-balastos para ferrocarriles.
- ◆ Protección de taludes en presas y almacenamiento.
- ◆ Protección de terraplenes contra la erosión.
- ◆ Protección contra la erosión de márgenes, producida por corrientes fluviales.
- ◆ Protección contra la erosión de playas por corrientes y oleajes del mar.
- ◆ Estabilización de taludes.
- ◆ Revestimiento de canales.
- ◆ Impermeabilización de almacenamiento de agua.
- ◆ Construcción de acceso a puentes.
- ◆ Construcción de silos enterrados.
- ◆ Construcción de cimentaciones.
- ◆ Construcción de carpetas de rodadura para vías de poco tráfico.
- ◆ Construcción de trincheras semiflexibles para la cimentación de presas.
- ◆ Inyección de pantallas y delantales para el control del flujo de agua.

- **Ventajas de la estabilización de suelos con cemento portland**

Entre las principales ventajas que presenta el uso de la estabilización de suelos con cemento se encuentran::

- ◆ Aumenta enormemente la potencialidad de uso de los bancos de materiales lo cual representa considerables ahorros en tiempos de construcción y/o costos de transporte en zonas donde exista escasez de materiales.
 - ◆ Las bases de suelo–cemento son bastante mas rígidas que las bases de material granular lo que permite mejorar la transmisión de la presión de las llantas a la sub-base.
 - ◆ Prolongada utilización bajo condiciones adversas.
 - ◆ Facilidad de construcción mediante la utilización de equipos muy sencillos.
 - ◆ Su resistencia se incrementa con el tiempo disminuyendo de esta manera los costos de utilización e incrementando su vida útil.
- **Desventajas de la utilización de suelos con cemento portland**

Las principales desventajas que presenta la utilización de suelo–cemento son:

- ◆ Aumento de los costos por la adición de cemento.
 - ◆ La rapidez con que debe realizarse el proceso constructivo una vez se le ha adicionado el agua y el cemento al suelo.
 - ◆ La necesidad de un mayor y mejor control de calidad.
 - ◆ Dificultad para la liga entre las diferentes capas.
 - ◆ Se presenta un mayor agrietamiento de los pavimentos.
 - ◆ Se requiere personal especializado.
 - ◆ El desconocimiento de la técnica.
 - ◆ Los cuidados preventivos que debe tener el personal para evitar los daños que puede provocar el constante contacto con cemento.
- **Mecanismo de estabilización**

La adición de cemento al suelo hace que se realicen diferentes reacciones de naturaleza físico–química.

Reacción química es función de las características de los agentes químicos presentes en la mezcla, de la concentración de los mismos, del tiempo, tipo de suelo, tipo de cemento, curado y de los aditivos; pero en todo caso la reacción del cemento con la arcilla no puede considerarse como la reacción de un cementante con un material inerte debido a que la arcilla reacciona químicamente con el cemento y cambia durante el proceso generando un material nuevo con propiedades diferentes, debido a que la adición de cemento a las arcillas altera la estructura interna de los materiales arcillosos.

De acuerdo con D. F. Noble (1967) para mezclas de suelos arcillosos con cemento se presentan las siguientes reacciones químicas en orden cronológico:

- ◆ Hidratación de los compuestos del cemento con producción de cal hidratada (Ca(OH)_2).
- ◆ Adsorción de calcio en los sitios de intercambio catiónico.
- ◆ Adsorción de la cal hidratada en la superficie de la arcilla.
- ◆ Encapsulación de los cristales de Ca(OH)_2 por geles de silicatos y aluminatos de calcio.
- ◆ Posible encapsulación de los granos de cemento por arcillas y geles.
- ◆ Reacción química entre la Ca(OH)_2 con los SiO_2 y Al_2O_3 .

Pero según A. Herzog y J. K. Mitchell (1936) las reacciones presentadas entre los suelos arcillosos y el cemento se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- ◆ La hidrólisis e hidratación del cemento dando como resultado el incremento del pH y la liberación de calcio.
- ◆ Debido al mayor valor de pH y al calcio libre se inicia una reacción química con las partículas de arcilla causando el rompimiento de los silicatos y alúminas amorfas las cuales se combinan con el calcio produciendo una reacción cementante.

De todas maneras se puede observar que la interacción de limos y arcillas con el cemento es similar a la presentada con la cal en la cual se presentan dos tipos básicos de reacciones:

- ◆ Reacción rápida donde ocurre un intercambio catiónico y la floculación.
- ◆ Reacción lenta donde se presentan fenómenos como la carbonatación, reacciones puzolánicas y la formación de nuevas partículas.

Pero en la segunda reacción de arcillas con el cemento, la arcilla floculada establece puntos de contacto con las partículas de cemento más grandes y solo ahí se da este tipo de reacción.

Para que la formación de materiales cementante se pueda dar es necesario la disolución de los silicatos y aluminatos lo cual solo es posible gracias al ataque de los ácidos, razón por la cual es deseable tener un pH alto, además existen otros factores que influyen en la solubilidad como son las impurezas, la distribución granulométrica y sobre todo la estructura mineralógica; es así como los minerales que presentan tres capas de estructuras (montmorillonitas) son más solubles que aquellas que tienen dos (caolinitas).

- **Tipos de suelos adecuados para estabilizar**

En teoría cualquier tipo de suelo puede estabilizarse con cemento a excepción de suelos con bastante contenido de sales que afecten al cemento, suelos con materia orgánica o suelos deletéreos. Pero para que la aplicación de esta tecnología sea práctica y económicamente viable los suelos que se empleen en la estabilización deben cumplir con los siguientes requisitos:

- ◆ El tamaño máximo de las partículas de suelo no debe superar la tercera parte del espesor de la capa compactada.
- ◆ El porcentaje de las partículas finas que pasan la malla No. 200 debe ser cercano al 50%.
- ◆ El límite líquido debe ser menor del 50%.
- ◆ El Índice de plasticidad debe ser menor al 25%.

- **Construcción de suelos finos tratados con cemento**

El procedimiento de construcción de los suelos estabilizados con cemento merece ser estudiado cuidadosamente con el fin de lograr los mejores resultados posibles en cuanto a rendimientos de construcción y calidad del producto terminado. La escogencia del equipo, personal y materiales, deben de ser acordes con las dimensiones de los tramos a construir, las características de los diferentes suelos a estabilizar y a las condiciones climatológicas de la región. Es conveniente que los equipos, materiales y el personal sea lo suficientemente flexible con el fin de que se ajuste a las cambiantes condiciones tanto del suelo a estabilizar como las climáticas.

Durante los procesos constructivos deberán hacerse continuos ajustes a los porcentajes de cemento y sobre todo a la cantidad de agua para la mezcla, teniendo en cuenta las condiciones cambiantes del suelo de la zona y a las condiciones climatológicas e hidrológicas de la región.

Los principales procesos a seguir en una construcción de un suelo estabilizado con cemento son los siguientes:

1. Corrección de los posibles fallos que se presenten en el terreno.
2. Limpieza de la zona.
3. Perfilación del terreno tanto longitudinal como transversalmente.
4. Escarificación del suelo hasta el espesor de la capa a estabilizar.
5. Pulverización del suelo con el fin de facilitar el mezclado.
6. Prehumedecer el suelo en caso de ser necesario para mejorar la manejabilidad del material.
7. Segunda perfilada.

8. Distribución del cemento ya sea en sacos o a granel.
9. Aspersión del cemento en toda el área a estabilizar.
10. Mezclado inicial del suelo con el cemento.
11. Adición de agua para alcanzar la humedad de compactación.
12. Mezclado final de los materiales.
13. Perfilación final
14. Compactación de la capa.
15. Acabados.
16. Construcción de Juntas.
17. Curado.

➤ **Estabilización de suelos finos con productos no convencionales**

• **Introducción**

Para la estabilización de suelos se han aplicado un gran número de productos químicos con el fin de mejorar una o varias de sus propiedades, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios, debido a la gran variedad de productos empleados para tratar los suelos resultaría supremamente extenso realizar un análisis de cada uno de ellos por esta razón el presente documento se limitará a los productos más conocidos en nuestro medio como son el cloruro de sodio, cloruro de calcio, soda cáustica, silicato de sodio, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, “dynasolo”, aceites sulfonados, polímeros y resinas.

• **Estabilización de suelos con sales**

A continuación se tratan los puntos más sobresalientes de un proceso de estabilización de suelos con los diferentes tipos de sales más empleadas dentro del proceso.

A. Sales

La sal se forma de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂), o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas es decir que no contienen iones ácidos (H⁺) o iones básicos (OH⁻).

✓ **Estabilización con cloruro de sodio**

Existen tres métodos para la obtención del cloruro de sodio:

1. El empleo del calor solar para evaporar el agua salada para obtener residuos de sal.
2. Extracción del cloruro de sodio de las minas de sal.
3. Evaporación del agua de mar mediante el empleo de grandes hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales fácilmente solubles en agua los cuales son higroscópicos. La adición de la sal al agua permite abatir la temperatura de congelamiento la cual puede llegar a -22°C con la adición del 2 al 3% de sal, adicionalmente la adición de sal permite lograr una mayor tensión superficial y disminuye la presión del vapor.

Los cambios en las propiedades del agua por la adición de sal dependen de la solubilidad de la sal, entre mayor sea la solubilidad mayor será el efecto sobre el agua.

La adición de cloruro de sodio a un suelo puede producir los siguientes efectos sobre el suelo:

- ◆ Disminución de la humedad óptima de compactación.
- ◆ Provoca una redistribución de las partículas de la arcilla en forma dispersa logrando con esto un acercamiento entre partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico.
- ◆ Permite reducir los cambios de humedad en los suelos dado que se reduce la evaporación del agua debido al incremento de la tensión superficial.
- ◆ En algunos casos se ha logrado la disminución de los cambios volumétricos mediante la adición de sal a una arcilla, pero en otros se presenta el efecto contrario.

Los trabajos realizados han demostrado que los efectos de la sal respecto a la plasticidad son muy variables existiendo gran dependencia de los minerales arcillosos, pero se logra mejores resultados cuando el límite líquido es mayor.

El mejor aporte que realiza la sal a un suelo es la reducción del problema que este presenta debido al congelamiento.

La utilización de sal en rocas carbonatadas puede producir carbonatos que cementan el suelo generando importantes incrementos de resistencia.

Pero en general se puede decir que el empleo de la sal puede producir efectos difíciles de predecir por lo que es necesario antes de su empleo realizar un riguroso estudio que permita determinar los verdaderos beneficios a obtener teniendo en cuenta el tipo y composición del suelo y las condiciones especiales de la obra.

La estabilización de un suelo con cloruro de sodio presenta las siguientes limitaciones:

1. El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
2. Se presentan mejores resultados si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal.
3. La materia orgánica inhibe la acción de la sal.
4. El rodillo pata de cabra no da buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.
5. Es necesario la intervención de un técnico especializado en el estudio de estabilizaciones con sal.

✓ **Estabilización con cloruro de calcio (CaCl_2)**

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto de algunos procesos industriales, siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos. El cloruro de calcio es un material delicuescente y giroscópico y aunque no impide la evaporación en forma apreciable si repone en forma relativamente rápida el agua evaporada por encontrarse esta presente en la humedad ambiente.

El cloruro de calcio permite reducir un poco la evaporación en los suelos, incrementar la tensión superficial en el agua y reducir el punto de congelación del agua.

La adición del cloruro de calcio disminuye las fuerzas de repulsión entre las partículas de arcilla e incluso puede llegar a reforzar eléctricamente la película de agua alrededor de las partículas de arcilla incrementando de esta manera la cohesión aparente del suelo. El cloruro de calcio reacciona con las partículas de arcilla generando un intercambio catiónico en el cual se sustituye un ión de Ca^{++} por dos iones de Na^+ consiguiendo con esto una reducción en el espesor de la doble capa lo cual hace que se presente una disminución en las fuerzas de repulsión entre partículas provocando con ello mejores ligas entre las partículas, esta reacción es más significativa si en la reacción del cloruro de calcio con la arcilla se forma ácido clorhídrico dado que los iones Ca^{++} reemplazan a iones Al^{+++} disminuyendo aun más las fuerzas de repulsión.

Los efectos benéficos que se obtienen por la adición del cloruro de calcio podrían ser contrarios si se adiciona en exceso ya que esto provocaría que todas las partículas obtuvieran cargas positivas generando fuerzas de repulsión que las separa.

El cloruro de calcio ayuda a mantener la humedad constante en un suelo dado que esta sal es capaz de reducir la evaporación y de absorber agua hasta 10 veces su

propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente pero lastimosamente esta sal es fácilmente lavable.

✓ **Estabilización con silicato de sodio**

El silicato de sodio es un compuesto químico que posee un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas, se ha empleado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante, catalizador, etc. Se produce con diferentes grados de alcalinidad, tamaño de partículas y pureza. Se obtiene de la mezcla de materiales con alta proporción de sílice con sales de sodio y agua.

La mayoría de los silicatos de sodio se obtienen de la fusión de una arena especial con carbonato de sodio a altas temperaturas obteniendo un vidrio fundido que se puede dejar solidificar para la posterior molienda al tamaño deseado o se puede disolver mediante la aplicación de vapor a alta presión para obtener consistencia líquida a diferentes concentraciones. El silicato de sodio en solución es incoloro e inodoro y actúa como un jabón fuerte.

Todos los silicatos de sodio son alcalinos y si se les mezcla en una solución con un material ácido, la mezcla obtenida se volverá lechosa e iridiscente. Si la concentración de sílice es superior al 1 o 2% se precipitará ácido silícico y ocurre la formación de un gel. Pero si las concentraciones de sílice son menores se formará un sol cuyas partículas coloidales hidratadas adquieren cargas negativas.

Propiedades de resistencia, durabilidad y permeabilidad del gel formado son muy variables y dependen de factores como la concentración de la solución, la relación Na_2/SiO_2 , temperatura y tipos de ácidos, sales o bases que intervengan en la reacción.

La efectividad del silicato de sodio como estabilizante de suelos se ha reportado desde 1945; algunas veces se ha empleado solo y otras veces junto con otros productos químicos, pero se lograron mejores resultados cuando se empleó para estabilizar suelos arenosos en climas moderados. Cuando se usa únicamente silicato de sodio, en otro tipo de suelos se requiere de la utilización de otros productos químicos adicionales.

Debido a que el proceso de formación del gel no ha sido completamente definida ha resultado imposible establecer la reacción que se presenta entre el suelo y el silicato de sodio. Se ha establecido que este reacciona con algunos minerales arcillosos pero sin lograr determinar como es dicha reacción.

El silicato de sodio se puede utilizar en la estabilización de suelos cuando se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en agua pues esto genera la formación de

silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un excelente cementante.

El efecto de la adición de silicato de sodio a cierto tipo de suelos ha sido el de incrementar la capacidad del suelo a mantener el 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 equivaliendo esto a la acción cementante entre partículas; en otras ocasiones se ha establecido que el silicato se precipita formando una matriz continua, en la que se presenta una liga iónica fuerte y rígida entre las partículas de suelo y el estabilizante. La aplicación del silicato de sodio en arcillas poco activas como la caolinita las hace menos activas, pasando lo contrario en arcillas de alta actividad como las motmorillonitas.

La aplicación del silicato de sodio en arcillas puras no ha producido resultados satisfactorios en cuanto al incremento de resistencia se refiere, lo que no ocurre en el caso de las arenas, en donde se ha encontrado que pequeñas cantidades de silicato de sodio como el 2.5% han permitido la obtención de resistencias del orden de 100 kg/cm². En otras ocasiones se ha empleado el silicato de sodio en proporciones del 1 al 3% en arenas para formar una costra superficial que si bien es cierto, no presenta una gran resistencia, si evita que las partículas se desprendan.

En cuanto al peso volumétrico, a la fecha no existen datos que confirmen una tendencia clara sin embargo parece ser que lo que se puede presentar es un incremento en la humedad óptima.

B. Estabilización de suelos con ácidos inorgánicos

En los últimos años se han utilizado varios ácidos para la estabilización de suelos, algunos han demostrado tener cierta efectividad para modificar favorablemente los suelos pero no son económicamente rentables comparados con otros productos más comunes. Además con los ácidos se debe tener especial cuidado y contar con asesoría especializada durante el diseño y la construcción pues existen peligros para las personas y los equipos.

Los productos ácidos empleados en la estabilización son muy variados pero es importante mencionar dos que cubren una amplia gama de ácidos inorgánicos como son el ácido fosfórico y el ácido fluorhídrico.

✓ **Estabilización con ácido fosfórico (H₃PO₄)**

El tratamiento con este producto está indicado para suelos de naturaleza ácida y han resultado ser ineficaces en los casos de materiales alcalinos, en limos y arenas.

El uso de los ácidos fosfóricos o los fosfatos en la estabilización de suelos presenta dos ventajas muy particulares que deben ser mencionadas:

1. Los materiales arcillosos denominados cloritas, cuyo comportamiento no está bien definido en los tratamientos con cal o cemento, reacciona de una manera perfecta con el ácido fosfórico.
2. Se presenta una ruptura de la estructura inicial del ión fosfato al actuar sobre la arcilla, lo cual permite obtener una mayor densificación en el suelo, resultando de ellos una mayor resistencia mecánica.

Por lo anterior el ácido fosfórico resulta muy deseable para la estabilización de suelos localizados en regiones de naturaleza volcánica en donde es abundante la clorita.

Los cambios producidos por el ácido fosfórico en las propiedades de los suelos arcillosos se deben a que este reacciona directamente con la estructura interna de la arcilla. Se observa que la adición de ácido fosfórico provoca un rompimiento en los cristales de la arcilla presentándose una reacción química en la que se producen fosfatos de aluminio y agua originando un compuesto soluble que es el elemento cementante durante la estabilización.

El ácido fosfórico es un agente estabilizante que desarrolla de manera sensible diferentes características de resistencia en los suelos finos que contienen minerales arcillosos, se observa que la reacción con la clorita es rápida y completa, con la motmorillonita es rápida pero incompleta y con la caolinita y la verniculita es lenta y continua.

La estabilización de suelos arcillosos con ácido fosfórico se ve afectada por variables como el tipo de suelo, la humedad, el grado de compactación, forma de mezclado y curado, la cantidad efectiva de estabilizante y las condiciones ambientales.

Estabilizaciones de suelos arcillo-limosos han mostrado un incremento proporcional de la resistencia con el incremento de las cantidades de ácido fosfórico adicionadas hasta una cantidad del 2% aproximadamente; más allá de esta cantidad no se observan incrementos considerables de resistencia. Los beneficios del ácido fosfórico se presenta principalmente en las tres primeras semanas a partir de las cuales se continúan presentando incrementos de resistencia pero en menores proporciones.

La adición del ácido fosfórico también produce aumento en el peso volumétrico del suelo, reducción en la humedad óptima de compactación y reducción en los cambios volumétricos de las arcillas. Lo anterior permite deducir que el ácido fosfórico es un estabilizador efectivo para una amplia variedad de materiales que contienen arcilla requiriendo porcentajes que varían entre el 1 y el 5%.

✓ **Estabilización con ácido fluorhídrico**

Trabajos de investigación realizados han demostrado que es un estabilizador efectivo en arcillas con excepción de aquellas que tienen altos contenidos de aluminio (caolín, bauxita). El ácido fluorhídrico reacciona con la sílice de las arenas o arcillas produciendo fluoruros de silicatos insolubles y de alta resistencia.

La utilización del ácido fluorhídrico en la estabilización de suelos presenta el inconveniente de su alto costo y de la acción altamente corrosiva que obliga a tener cuidados muy especiales durante su aplicación.

C. Estabilización de suelos con resinas y polímeros

✓ **Estabilización con resinas**

El principal objeto de la estabilización de suelos con estos materiales es el de formar una estructura impermeable al agua, aunque existen ciertas resinas como las del sistema anilina y furfural de naturaleza orgánica que permiten obtener aumentos en la resistencia mecánica del suelo mediante la mejora de la cohesión.

La anilina es un derivado líquido del alquitrán de hulla y el furfural es un producto orgánico líquido producido en la refinación de los derivados del maíz los cuales mezclados en proporción 2 a 1 reaccionan formando una resina viscosa que se endurece lentamente hasta su solidificación total. De esta manera se puede lograr la estabilización de arenas sueltas de una manera muy rápida utilizando proporciones del 1 al 2% presentándose los mejores resultados en suelos de naturaleza ácida.

En la utilización de resinas sintéticas de anilina con furfural se deben tomar ciertas precauciones debido a la toxicidad de la anilina. Existen otras mezclas menos tóxicas con propiedades de estabilización similares como la caseína, el formaldehído y la urea.

También se han utilizado resinas naturales pero estas presentan la desventaja de ser susceptibles al ataque de las bacterias y a otros tipos de degradaciones limitando de esta manera su vida útil.

La ligninas se han utilizado en la estabilización de suelos usando residuos de la fabricación del papel tales como el licor de sulfito. El componente activo en estos productos es la molécula de lignina dispuesta en una estructura compleja de grupos hidroxílicos y carboxílicos las cuales se ligan a las partículas silíceas del suelo.

La forma más común de estos agentes estabilizantes es la cromo–lignina que usada en concentraciones del 10 al 20% producen aumentos en la resistencia debidos al ligamento que se produce entre la arcilla y las moléculas de lignina reforzada por el ión cromo. Este tratamiento es particularmente ventajoso en suelos de origen volcánico y en suelos de naturaleza clorítica en los cuales los métodos convencionales presentan ciertas deficiencias y su aplicación resulta muy costosa.

✓ **Estabilización con polímeros**

Los polímeros son cuerpos que constan de elementos de la misma especie y en la misma proporción que la resinas pero en un número tal que las moléculas de unos son múltiplos de las del otro, siendo sus pesos también múltiplos, entre los monómeros más conocidos tenemos el etino (C_2H_2), el butanotrieno (C_4H_4) y el benceno (C_6H_6) y la unión de numerosas moléculas de este tipo a través de una reacción química o una serie de reacciones forman moléculas gigantescas denominadas Polímeros.

Se ha usado un gran número de polímeros como estabilizantes de suelos, los cuales podemos clasificar entre grandes grupos:

1. Polímeros tipo catiónico: son aquellos que tienen carga positiva y permiten la formación de ligaduras electrostáticas muy fuertes con la cargas negativas de los minerales de la arcilla y la arena fina dando con ello origen a una floculación que reestructura el suelo y que permite mejorar su resistencia al esfuerzo cortante.

En el empleo de este material debe tenerse especial cuidado durante el proceso de compactación dado que la resistencia del material estabilizado puede verse afectado por la energía de compactación ya que esta puede destruir la estructura recién ligada obteniéndose además pesos volumétricos mas bajos.

Entre los polímeros catiónicos más utilizados están las poliacrilaminas, el armeen, el arquad y otros. Su uso a gran escala es limitado debido

principalmente a su alto costo, la delicada operación de mezclado y su variabilidad. Además el mezclado resulta difícil porque se deben utilizar proporciones muy pequeñas que deben quedar uniformemente distribuidas.

2. Polímeros de tipo no-iónico: entre los más importantes están el alcohol polivinílico y la celulosa carbometílica las cuales deben sus propiedades de estabilizantes al refuerzo de las ligaduras hidroxílicas que se forman con grupos OH⁻ entre las cadenas de polímeros y las superficies oxigenadas de los minerales de arcilla.
3. Polímeros de tipo aniónico: entre los más importantes se encuentran los sulfonatos y lignosulfonatos. Debido a que la carga de sus grupos constituyentes es igual a la que existe en la superficie de los minerales arcillosos , la resistencia al esfuerzo cortante se reduce en tanto que la compactación se mejora notablemente por esta razón a estos productos se les conoce como agentes que mejoran la compactación, un gran numero de productos comerciales caen en esta categoría y su efectividad es muy variable dependiendo del tipo de suelo y los elementos constituyentes del aditivo.

2. MATERIALES

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

2.1.1. Localización y descripción de los suelos

Los suelos están localizados en los alrededores de la ciudad de Popayán (Colombia), inicialmente se tomaron 10 muestras de suelos de las cuales luego de una inspección ocular y del conocimiento en el estudio de estos materiales el director del proyecto selecciono 5 tipos de suelos tratando de que estos fueran diferentes entre si. Estos suelos se encuentran en grandes cantidades en la ciudad, es decir son suelos característicos de la región.

Para su fácil identificación se nombraron por números así:

Suelo 1: Suelo limoso de color amarillo-café localizado en el K10+490 de la vía Popayán-Pasto cerca al estadero Mi Bohío este suelo se encontró a una profundidad de 50 cm al pie de la vía en el carril derecho dirección norte a sur.

Suelo 2: Suelo de color rosado con vetas blancas localizado en la vía Popayán-Pasto frente a una antigua bodega con estructura metálica. El suelo es proveniente del talud localizado al lado derecho de la vía en la dirección norte - sur.

Suelo 3: Suelo limo-arenoso de color habano con vetas grises localizado en la vía al Tambo cerca a Río Hondo en el carril izquierdo sobre talud.

Suelo 4: Suelo de color amarillo localizado en la vía Popayán-Cali en el sector del Cofre sobre vía alterna en el lado izquierdo de sur a norte.

Suelo 5: Suelo arcilloso de color gris localizado en la facultad de Educación de la Universidad del Cauca. Muestras tomadas durante la construcción del nuevo edificio de esa facultad.

2.1.2. Propiedades físicas de los suelos finos⁵

✓ Introducción

En el ejercicio de la ingeniería civil se encuentran diversos e importantes problemas planteados por el terreno, el cual sirve de cimentación para las estructuras y terraplenes.

El suelo es el material de construcción más antiguo y abundante del mundo y en muchos casos constituye el único material disponible localmente. Desde tiempos muy antiguos el suelo se ha utilizado para la construcción de monumentos, tumbas, viviendas, vías de comunicación y estructuras para retención de agua.

Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción debe seleccionar el más apropiado, así como el método de construcción y los adecuados controles del proceso constructivo. Una parte importante de las tareas del ingeniero es cerciorarse que las propiedades del material colocado correspondan a las supuestas en el proyecto.

✓ Propiedades físicas de los suelos

Los suelos están formados por granos independientes, los cuales pueden ser apreciados por el ojo humano en el caso de suelos gruesos o a través de un microscopio en el caso de suelos finos. En el caso de los metales los cristales que lo forman se encuentran fuertemente unidos entre sí, lo que no permite el fácil movimiento de unos con respecto a otros, en los fluidos las partículas que lo conforman se mueven con relativa facilidad. A diferencia de los metales y los fluidos las partículas que conforman un suelo pueden moverse unas con respecto a otras pero con cierta dificultad, haciendo de esta manera que el suelo sea intrínsecamente un sistema de partículas.

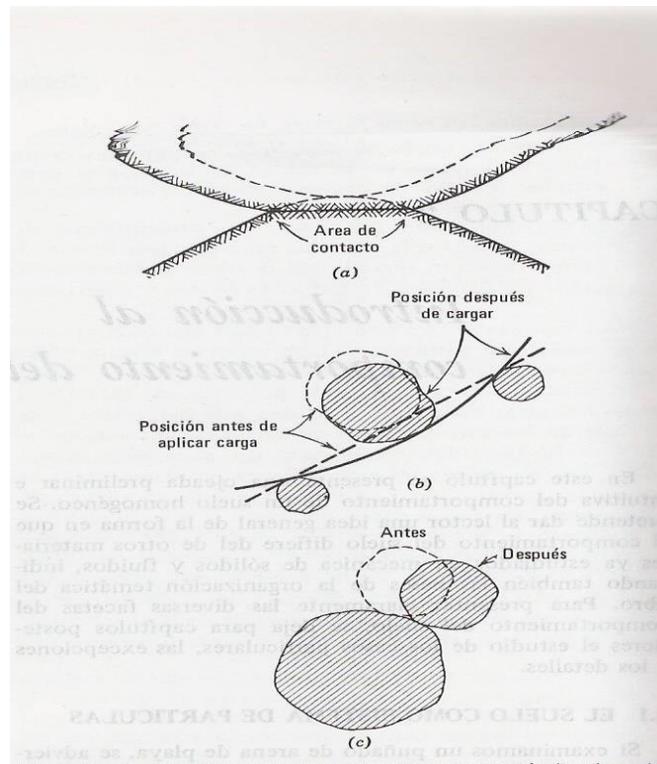
➤ Deformación

Cuando al suelo se le aplican fuerzas, estas son transmitidas a través del mismo, desarrollando fuerzas de contacto entre partículas adyacentes. Debido a las fuerzas de contacto entre las partículas estas sufren diferentes tipos de deformaciones, siendo las más habituales las deformaciones elásticas y las deformaciones plásticas. También puede presentarse la fractura y el aplastamiento de las partículas.

⁵ Lambe, T William. Whitman, Robert V. Mecánica de Suelos. Instituto Tecnológico de Massachussets. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México D.F. 2001

La deformación de las partículas del suelo ante la acción de las cargas produce un aumento en el área de contacto de las partículas y una aproximación de los centros de gravedad. Además, una vez la fuerza tangencial en el punto de contacto supera la resistencia tangencial en el mismo punto, se produce un desplazamiento relativo entre las partículas. La unión del desplazamiento relativo de las partículas y las deformaciones individuales de las mismas corresponden a la deformación general del suelo. Lo anterior se puede observar de manera grafica en la ilustración 1

Ilustración 1. Movimiento relativo entre partículas del suelo



Fuente: Lambe, T William. Whitman, Robert V. Mecánica de Suelos

La experiencia ha demostrado que la deformación general de una masa de suelo es debida principalmente a la deformación relativa de las partículas y a la reorganización de las partículas, lo cual hace que el esqueleto mineral del suelo sea bastante deformable.

Debido a que el deslizamiento es una deformación no lineal e irreversible , se puede esperar que el comportamiento esfuerzo – deformación del suelo también sea no lineal e irreversible.

➤ Tamaño de las partículas

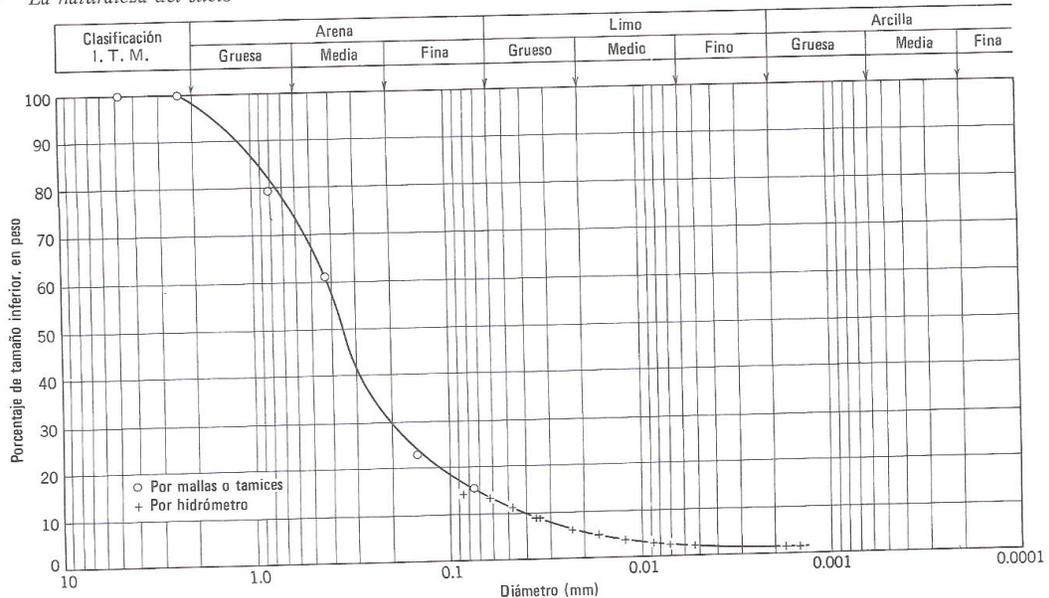
El tamaño de las partículas del suelo influye notoriamente en las propiedades físicas del mismo, razón por la cual se debe determinar la distribución granulométrica de las partículas del suelo.

Los métodos para la determinación de la distribución de las partículas por tamaño son aproximados y su definición es diferente para las fracciones gruesas que para las finas.

En la ilustración 2 se observa la curva granulométrica de un suelo, en ella también se pueden observar los tamaños típicos de cada una de las clases de suelos.

Ilustración 2. Curva granulométrica de un suelo

44. *La naturaleza del suelo*



Fuente: Lambe, T William. Whitman, Robert V. Mecánica de Suelos

➤ Límites de consistencia

El suelo es un material que puede presentarse en varios estados según su contenido de humedad. Cuanto mayor sea el contenido de agua del suelo menor será la interacción de las partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido.

El suelo al ser sometido a secado pasa por las siguientes fases generales:

1. Estado líquido: El suelo tiene las propiedades y apariencia de una suspensión o de un fluido viscoso.
2. Estado plástico: Es el estado en el cual el suelo se comporta plásticamente.
3. Estado semisólido: En este estado el suelo tiene la apariencia de un sólido pero aún disminuye de volumen al someterse a secado.
4. Estado sólido: Es el estado para el cual el volumen del suelo no varía con el secado.

La transición de un estado a otro ocurre dentro de un rango amplio de variación del contenido de humedad y por esto los límites son de naturaleza arbitraria. Estos límites fueron desarrollados por Atterberg en 1911 y son conocidos como límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg son los siguientes:

1. Límite líquido: Es la frontera entre el estado líquido y el estado plástico.
2. Límite plástico: Es la frontera entre el estado plástico y el estado semisólido.
3. Límite de contracción: Es la frontera entre el estado semisólido y el estado sólido.

➤ **Resistencia al corte**

Cuando a un suelo se le aplica una carga que hace que se rompa la resistencia al deslizamiento entre las partículas se presenta la falla del suelo. Esta se presenta a cierta carga vertical y es conocida como resistencia al esfuerzo cortante de un suelo.

✓ **Análisis físico**

Para la elaboración de los análisis físicos se siguió la siguiente metodología:

1. Humedad Natural
2. Análisis granulométricos.
3. Límites de consistencia.
4. Resistencia a la compresión.
5. Clasificación de suelos.
6. Densidad máxima y humedad óptima.

➤ **Determinación de la humedad natural**

✓ Metodología

Para la determinación de la humedad natural de los suelos se utilizó la metodología planteada por la norma INV-E-122, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

✓ Resultados

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la humedad natural en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 1. Datos de humedad natural halladas para las muestras de suelo

Suelo Número	Hn %
1	74.72
2	31.96
3	44.33
4	43.87

Se puede observar que el suelo 1 presenta una alta humedad natural, los demás suelos presentan humedades normales para los suelos finos.

➤ **Análisis granulométrico**

✓ Metodología

Para la realización del análisis granulométrico de los suelos se utilizó el método del hidrómetro según la norma INV-E-124, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

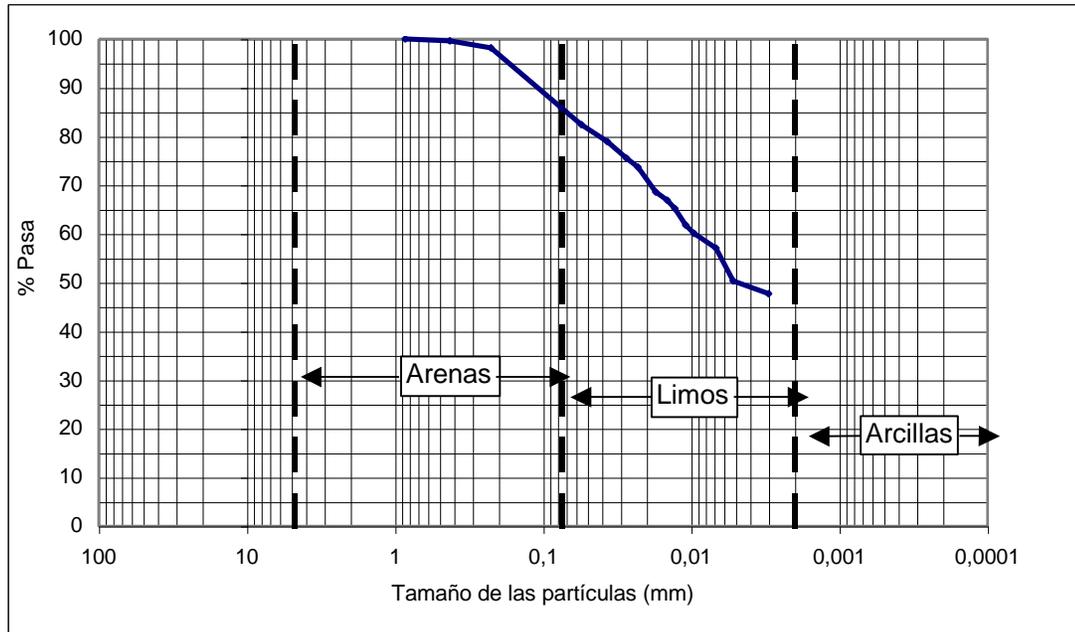
✓ Resultados

De los ensayos realizados se obtuvieron los siguientes resultados:

En la ilustración 3 se muestra la curva granulométrica obtenida para el suelo 1, en la cual se puede observar que el 86 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de un suelo fino. Adicionalmente se observa que el 38% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 3 micras y que el 48 % tienen tamaño inferior a 3 micras, de acuerdo a esto el 86% de las

partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de los limos y arcillas y también se presentan partículas de arena.

Ilustración 3. Análisis Granulométrico suelo 1



En la ilustración 4 se muestra la curva granulométrica obtenida para el suelo 2, en la cual se puede observar que el 67 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de un suelo fino. Adicionalmente se aprecia que el 48% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 3 micras y que el 19 % tienen tamaño inferior a 4 micras, de acuerdo a esto el 67% de las partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de los limos y también se presentan partículas de arena.

En la ilustración 5 se muestra la curva granulométrica obtenida para el suelo 3, en la cual se puede observar que el 43 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de una arena fina. Adicionalmente se aprecia que el 37.4% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 3 micras y que el 5.6 % tienen tamaño inferior a 4 micras, de acuerdo a esto el 57% de las partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de las arenas y también se presentan partículas de limo.

Ilustración 4. Análisis Granulométrico suelo 2

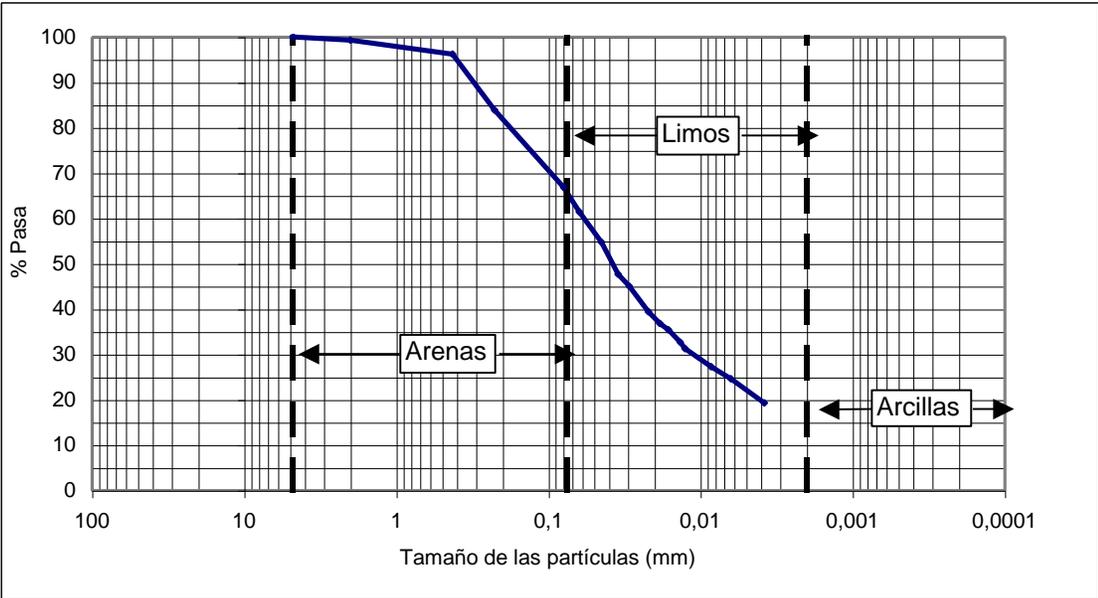
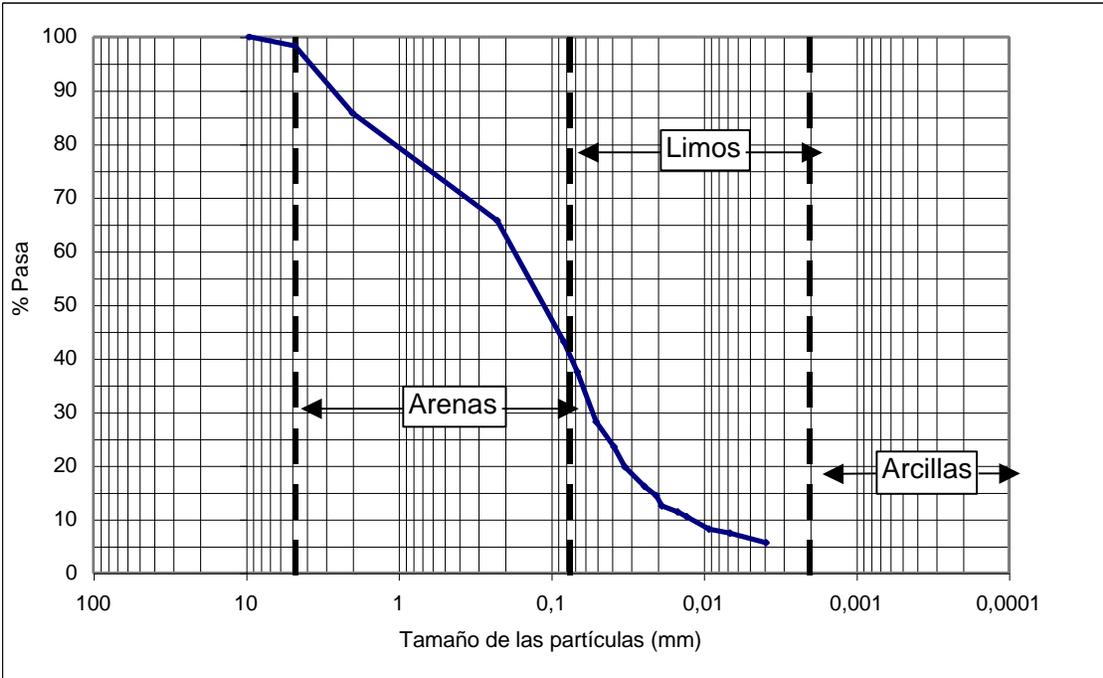
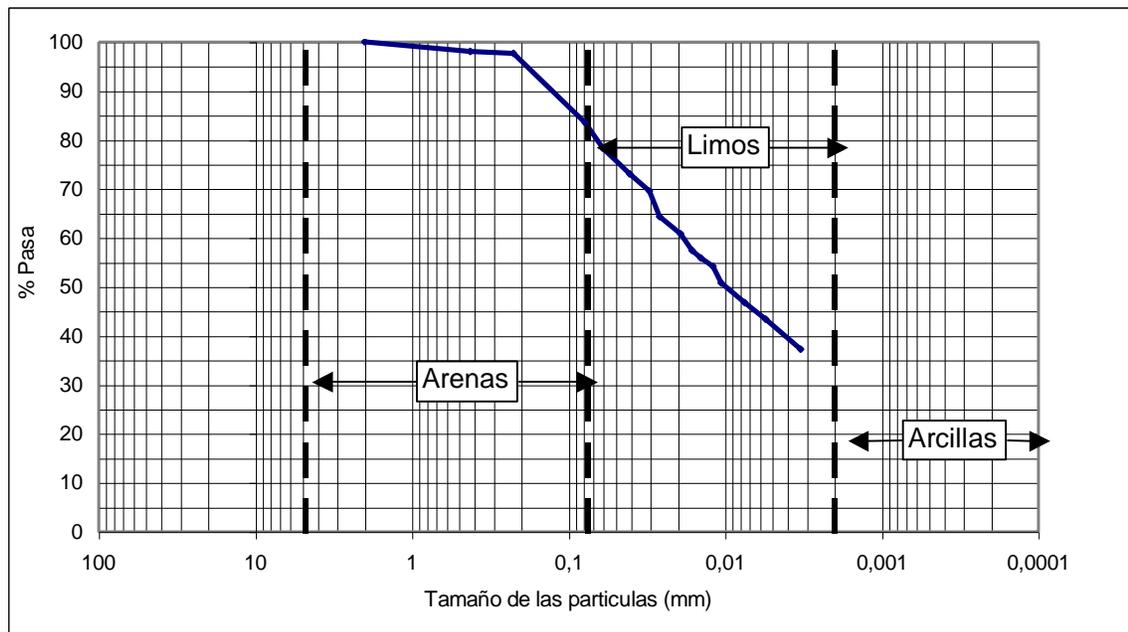


Ilustración 5. Análisis Granulométrico suelo 3



En ilustración 6 se muestra la curva granulométrica obtenida para el suelo 4, en la cual se puede observar que el 83 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de un suelo fino. Adicionalmente se aprecia que el 46.3% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 3 micras y que el 37.2 % tienen tamaño inferior a 4 micras, de acuerdo a esto el 83% de las partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de los limos y arcillas y también se presentan partículas de arena.

Ilustración 6 Análisis Granulométrico suelo 4



➤ Determinación de los límites de consistencia

✓ Metodología

Para la determinación de los límites de consistencia de los suelos se utilizó la metodología planteada por las normas INV-E-125 y INV-E-126, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

✓ Resultados

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de la medición de los límites en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 2. Límites de consistencia de los suelos

Suelo N°	Hn %	LL	LP	IP
1	74.72	86.20	53.60	32.60
2	31.96	33.20	25.20	8.00
3	44.33	47.50	36.50	11.00
4	43.87	56.70	39.30	17.40

➤ **Resistencia a la compresión**

✓ Metodología

Para la determinación de la resistencia a la compresión de los suelos se utilizó la metodología planteada por la norma INV-E-152, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

✓ Resultados

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la resistencia a la compresión en las diferentes muestras de suelo compactadas en el laboratorio a la energía del proctor modificado..

Tabla 3. Resistencia a la compresión

Suelo 1		Suelo 2		Suelo 3		Suelo 4	
Rc(kg/cm ²)	Hn%						
2.91	50.87	0.86	35.16	2.08	37.24	1.07	42.87
3.67	50.71	1.50	33.09	2.35	32.54	1.26	41.05
2.87	49.12	1.52	32.85	1.74	31.56	1.75	40.33
4.02	38.39	1.79	30.30	2.07	30.49	1.78	40.30

Se observa que los suelos presentan resistencia a la compresión que varía entre 1.0 y 4.0 kg/cm², adicionalmente es notoria la influencia del contenido de humedad en la resistencia del suelo.

➤ **Clasificación de suelos**

✓ Metodología

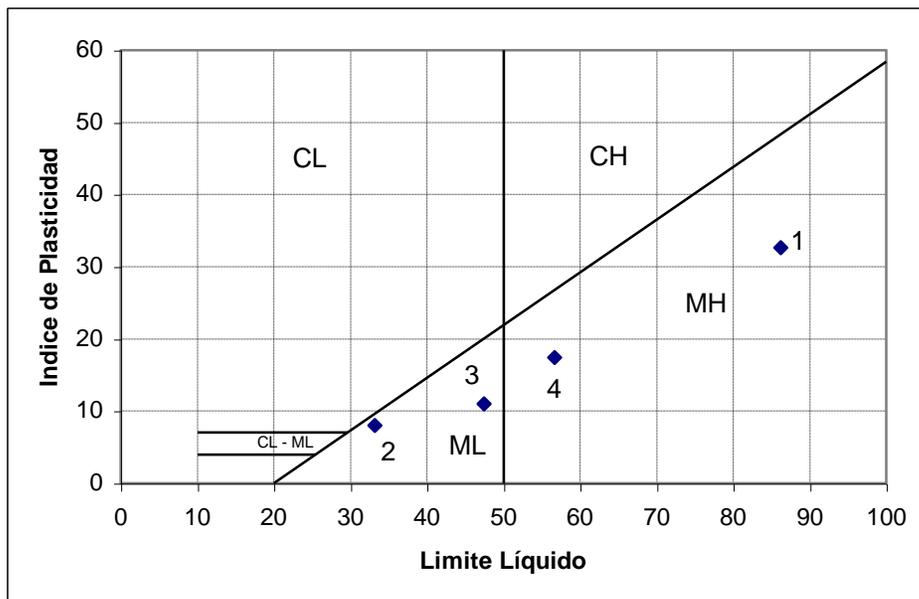
Para la clasificación de los suelos empleados se utilizaron el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos:

✓ Resultados

De acuerdo al análisis granulométrico presentado, puede observarse que los suelos 1, 2, y 4 presentan un porcentaje de partículas que pasan el tamiz 200 superior al 50% razón por la cual se clasifican como suelos finos y deberá utilizarse la Carta de Plasticidad de Casagrande para determinar el tipo de suelo. El suelo 3 presenta un porcentaje de partículas que pasan el tamiz 200 menor del 50% y el porcentaje de las partículas gruesa que pasa el tamiz 4 es superior al 50% razón por la cual se clasifica como una arena, pero teniendo en cuenta que la fracción que pasa el tamiz 200 es superior al 12% deberá emplearse la Carta de plasticidad de Casagrande para determinar el tipo de suelo.

En la ilustración 7 se presenta la clasificación de los suelos mediante el empleo de la carta de Clasificación de Casagrande

Ilustración 7. Clasificación de suelos mediante la utilización de la carta de Plasticidad de Casagrande



En la figura anterior se puede observar que los suelos 1 y 2 son limos de alta plasticidad y los suelos 2 y 3 son limos de baja plasticidad.

➤ **Densidad máxima y humedad óptima**

✓ Metodología

Para la determinación de la densidad máxima y la humedad óptima de los suelos se empleo el método del harvard miniatura.

✓ Resultados

De acuerdo a los resultados del harvard miniatura se obtuvieron los siguientes resultados:

Suelo No	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)
1	44.9	1.203
2	33.4	1.362
3	27.2	1.171
4	42.2	1.110
5	28.9	1.430

2.1.3. Propiedades químicas de los suelos finos

✓ **Introducción⁶**

El objetivo principal de la química es el estudio de la materia, teniendo en cuenta su naturaleza, estructura, propiedades y las transformaciones que pueda sufrir. Es importante tener claro que MATERIA es todo aquello que existe, lo cual regularmente se encuentra formado por la mezcla de distintos tipos de SUSTANCIAS que se pueden separar y diferenciar de acuerdo a su comportamiento. Las SUSTANCIAS son muestras de materia en estado de pureza, ósea que es un material de un mismo tipo que por lo tanto se le ha asignado un nombre con el cual se brinda la mayor información posible sobre la sustancia referida.

Existen una gran cantidad de sustancias que pueden ordenar básicamente en dos grupos:

1. Sustancias Simples o elementales: formado por más de un centenar de sustancias las cuales no se pueden descomponer en otras más sencillas mediante el empleo de algún método químico o físico. También son llamadas elementos y se representan mediante símbolos.

⁶ Torres Caicedo, Cruz Marina. Química aplicada a los pavimentos, Notas de clase, Universidad del Cauca. Popayán, 2001.

2. Sustancias Compuestas: las cuales están formadas por combinaciones de sustancias elementales pero que no constituyen mezclas ya que no son separables por medios físicos y su composición y características son uniformes.

Desde tiempo de los griegos se tienen nociones de que la materia esta compuesta por los ATOMOS, lo cual ha sido apoyado por pruebas que muestran la naturaleza del átomo y su perfil como unidad de la materia.

✓ **Comportamiento de los suelos**⁷

En los suelos gruesos se observa que las fuerzas gravitacionales ejercen una gran influencia sobre las partículas del suelo predominando sobre las demás fuerzas, razón por la cual el comportamiento mecánico e hidráulico de dichos suelos es similar y se encuentra definido por características circunstanciales tales como la compacidad del depósito y la orientación de las partículas.

Sin embargo, en los suelos finos existen otras fuerzas que ejercen una mayor influencia en el comportamiento de los suelos, lo cual se debe a que en este tipo de suelos la relación entre el área y el volumen alcanza valores significativos, haciendo que la magnitud de las fuerzas electromagnéticas que se generan en la superficie de los compuestos minerales alcance niveles importantes, en especial cuando se trata de tamaños de partículas inferiores a dos micras (0.002 mm).

La estructura interna de las arcillas se puede explicar como un conjunto de partículas cristalinas que poseen cargas eléctricas negativas, cuya intensidad depende de la estructuración y composición de la arcilla, Debido a lo anterior la arcilla atrae a las iones positivos del agua (H⁺) y a cationes de diferentes elementos químicos como Na⁺, K⁺, Ca⁺, Mg⁺⁺, Al⁺⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, etc. De esta forma cada partícula de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas de forma definida y ligadas a su estructura (agua absorbida).

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 que al ligarse a las partículas de suelo por su polo de carga positivo (+) su polo de carga negativo (-) queda en la posibilidad de actuar como origen de atracción para otros cationes positivos. Los propios cationes atraen otras moléculas de agua con lo cual se ve reforzada la película de agua ligada a la partícula de suelo. El espesor de la película de agua adsorbida por el cristal del suelo es función, no solo de la naturaleza del suelo, sino también del tipo de los cationes atraídos.

⁷ Badillo, Juárez. Rodríguez, Rico. Mecánica de Suelos, Tomo 1, Fundamentos de Mecánica de Suelos, Editorial Limusa, S.A. de C.V. México D.F., 1997.

La magnitud de las presiones de absorción existentes en la película de agua que rodea a un cristal de arcilla es del orden de los 20.000 kg/cm² y debido a que el punto de congelación del agua aumenta en la medida que aumenta la presión a la que está sometida, especialmente cuando esta supera los 6000 kg/cm², puede deducirse que en las temperaturas a que se encuentra normalmente una masa de suelo, la película de agua absorbida por los cristales de arcilla, tendrá propiedades similares a la del hielo sólido. Las moléculas de agua que se encuentran más alejadas se encuentran sometidas a presiones gradualmente menores, razón por la cual presenta propiedades intermedias entre el hielo y el agua en estado líquido normal, pudiendo decirse que su comportamiento es el de un fluido de alta viscosidad. Las moléculas del agua no sujetas al cristal por fuerzas de superficie mantienen sus propiedades usuales.

Terzaghi y Peck estiman que la capa sólida y viscosa de agua puede tener un espesor de 0.005 micras, y que este líquido presenta sus propiedades normales cuando la molécula está a una distancia superior a las 0.1 micras aproximadamente, a partir de la superficie del cristal.

➤ Intercambio Catiónico

Los cristales de arcilla pueden cambiar los cationes adsorbidos en su película superficial; por ejemplo, una arcilla hidrogenada (con cationes H⁺) puede transformarse en sódica, si se hace que circule a través de su masa, agua con sales de sodio en disolución. Lo que se presenta es un intercambio de cationes entre el agua y las películas adsorbidas por las partículas minerales, algunas veces la reacción es rápida. Los cationes intercambiables más usuales son: Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, H⁺ y (NH₄)⁺.

Las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que la motmorillonitas y las ilitas poseen la propiedad en grado intermedio.

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir a mayor pH menor será la actividad catiónica. La actividad catiónica se hace notable en general para valores de pH menores a 7. La actividad catiónica también crece con la velocidad y concentración de la solución que circule a través del suelo.

Las propiedades mecánicas de la arcilla varían dependiendo de los cationes contenidos en sus complejos de absorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden diferentes espesores de la película absorbida lo que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo.

➤ **Identificación de los minerales de arcilla**

Existen hoy varios procedimientos al alcance de los investigadores para identificar los minerales constituyentes de una arcilla, los más conocidos corresponden a los métodos de los Rayos X y el Balance Térmico de las arcillas, también se puede utilizar el microscopio electrónico ya que este proporciona datos útiles en cuanto a la forma y tamaño de las partículas minerales.

Los Rayos X se difractan a su paso a través de una partícula de arcilla y cada trayectoria de difracción es una imagen de distintos planos atómicos; el conjunto de trayectorias retrata la estructura interna de la arcilla. Así se revela un promedio de 20'000.000 de láminas reticulares por centímetro de material.

En términos generales, este método resulta ser el más informativo, pero debido al pequeño tamaño de los cristales y su orientación desordenada las trayectorias de la difracción se definen y distinguen muy difícilmente.

El efecto de las altas temperaturas sobre la arcilla es extraer el agua de sus retículas laminares transformando un mineral de arcilla en otro compuesto químico, por ejemplo, la caolinita permite la remoción del agua estructural a los 500°C transformándose en óxido de aluminio amorfo y sílice. Los demás minerales arcillosos presentan también efectos típicos permitiendo de esta manera ser identificados.

La utilización del balance térmico resulta dudoso sobre todo en arcillas formadas por mezclas mineralógicas. Lo anterior hace que los resultados obtenidos resulten de muy difícil e insegura interpretación.

El análisis químico también se ha usado ampliamente para la identificación de los minerales arcillosos. Este método resulta ser útil, pero presenta el inconveniente de suministrar la composición integral de la arcilla, sin informar la distribución de sus componentes en el caso de tratarse de arcillas producto de la mezcla de varios minerales. Aun en arcillas formadas por un solo mineral la composición de este puede tener variaciones importantes haciendo que los métodos químicos sean de pronósticos inseguros.

✓ **Origen de las arcillas silicatadas⁸**

Las arcillas silicatadas presentan su origen en los minerales primarios en especial los feldspatos que son minerales de silicatos de aluminio con potasio, sodio, calcio, magnesio y óxido de hierro, estos minerales al ser sometidos a la acción

⁸ Torres Caicedo, Cruz Marina. Química aplicada a los pavimentos, Notas de clase, Universidad del Cauca. Popayán, 2001

de los agentes meteorológicos (agua, viento, temperatura, presión, etc) sufren procesos de meteorización físico – química y biológica que producen cambios en su estructura debidos a la perdida de sus componentes y al mismo proceso de meteorización.

En la ilustración 8 puede observarse que si los minerales primarios pierden potasio y sílice se produce la illita y si ésta pierde aluminio, magnesio y potasio y gana sílice, se produce una montmorillonita, la cual al perder hierro, potasio y calcio por lavado (lixiviación) produce la caolinita, la cual al perder el sílice produce óxido de hierro y aluminio.

Además puede observarse diferentes caminos para producir un mismo tipo de arcilla y su comportamiento final dependen del origen del material y de los diferentes procesos que tuvo que soportar para llegar a su estado natural.

✓ **Minerales arcillosos**⁹

La descomposición de los silicatos de aluminio complejos (feldespatos, micas y minerales ferromagnesianos) presentes en las rocas para formar los minerales arcillosos, se produce de muchas maneras y por diferentes factores entre los que se encuentran la humedad, la temperatura, el ambiente oxidante o reductor, los iones presentes en solución, la presión y el tiempo. La descomposición de los feldespatos se puede simplificar mediante la siguiente expresión:



En la expresión se observan los siguientes productos:

1. Sílice (SiO_2): la cual está en forma de un gel coloidal o suspensión.
2. Bicarbonato potasico (KHCO_3): el cual está en solución.
3. Silicato de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): el cual es un mineral arcilloso simplificado.

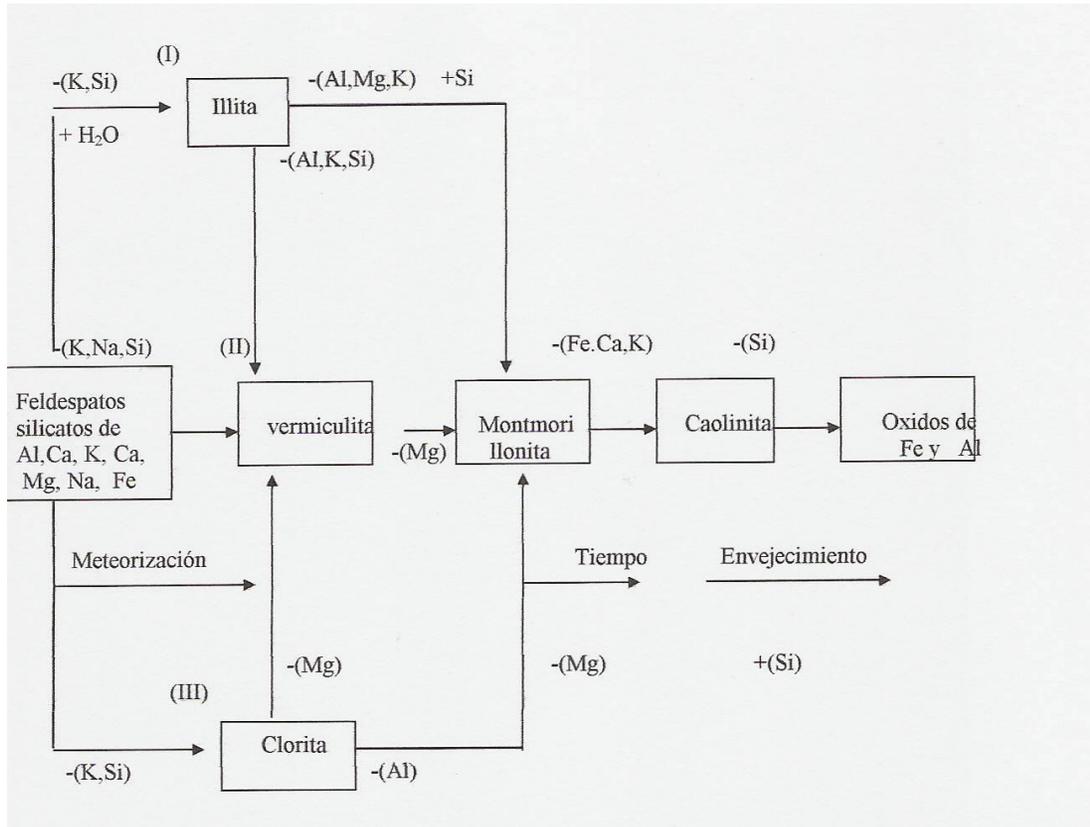
Existen muchas formas de minerales arcillosos con algunas semejanzas y grandes diferencias en composición, estructura y comportamiento, los cuales presentan las siguientes características:

- ✓ Grano fino.
- ✓ Grandes áreas superficiales por unidad de masa
- ✓ Estructura cristalina definida.
- ✓ Gran número de átomos agrupados en complejos modelos tridimensionales.

⁹ Torres Caicedo, Cruz Marina. Química aplicada a los pavimentos, Notas de clase, Universidad del Cauca. Popayán, 2001

✓ Eléctricamente activos.

Ilustración 8. Origen de las arcillas silicatadas



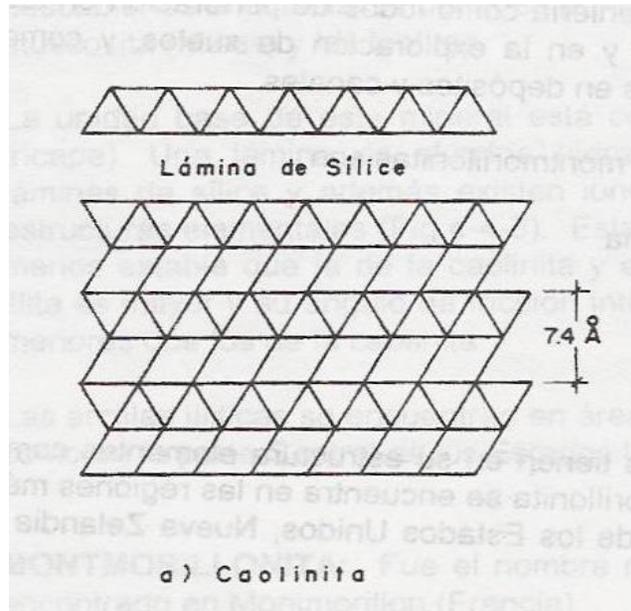
Fuente: Cruz Marina Torres, Química aplicada a pavimentos.

Existen diferentes tipos de minerales arcillosos siendo los más importantes los siguientes:

➤ Caolinita

Son minerales arcillosos formados por laminas de alúmina y sílice, a esta familia pertenecen varios miembros los cuales se diferencian por las variaciones de la lámina de alúmina. Las láminas se encuentran fuertemente unidas formando placas, además se apilan como las hojas de un libro y forman paquetes.

Ilustración 9. Caolinita



Fuente: Mecánica de Suelos. Ing. Margarita Polanco.

➤ Haloisita

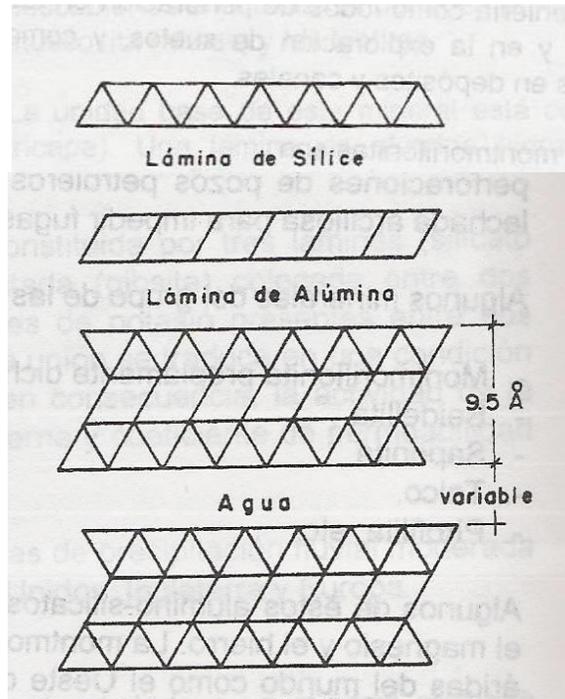
Es un miembro de la familia de las caolinitas que contienen una lámina de agua entre unidades adyacentes de arcilla y que pueden deshidratarse por secado reduciendo su espesor sin la posibilidad de recuperar su estado original mediante la adición de agua. El comportamiento ingenieril cambia considerablemente por hidratación.

➤ Montmorillonitas

Las montmorillonitas son una gran familia de minerales arcillosos compuestos de una lamina de alúmina ubicada entre dos laminas de sílice, algunas veces también son llamadas esmectitas.

Tienen la propiedad de que las unidades no se empaquetan fácilmente y cuando lo hacen se desprenden con facilidad, en ellas se presenta una gran sustitución isomorfa y cada una de ellas produce un mineral diferente. La variedad de montmorillonitas es multiplicada aún más por la variedad de cationes que se compensan en cada una de las sustituciones.

Ilustración 10. Montmorillonita



Fuente: Mecánica de Suelos. Ing. Margarita Polanco.

A este grupo pertenecen una gran variedad de diferentes minerales como son la nontronita, la sauconita y la soptonita, pero que desde el punto de vista ingenieril no presentan diferencias considerables.

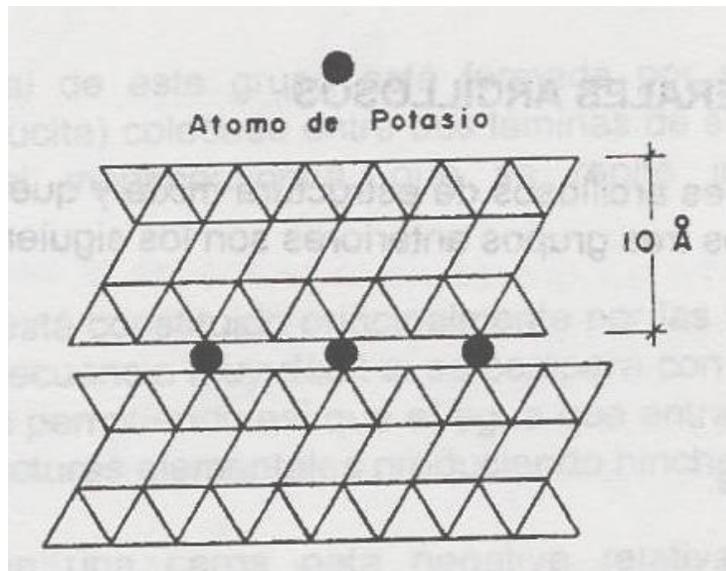
Las montmorillonitas se forman generalmente en regiones ricas en rocas ferromagnesianas (fuente del magnesio) tales como las volcánicas y particularmente en áreas de altas temperaturas e intensas lluvias.

➤ Iilitas

Al igual que la Montmorillonita las iilitas están formadas por una lámina de alúmina entre dos láminas de sílice pero sus unidades adyacentes se encuentran unidas por los átomos de potasio compartidos, de modo que forman paquetes bastante compactos.

Este tipo de minerales se presentan frecuentemente en las lutitas y otros depósitos que fueron sometidos a cambios ambientales y generalmente su origen se debe a la alteración de otros minerales arcillosos.

Ilustración 11. Illita



Fuente: Mecánica de Suelos. Ing. Margarita Polanco.

➤ Otros minerales

Adicionalmente a los minerales arcillosos mencionados, existen otros grupos menores de minerales entre los cuales se encuentran la Clorita y la Vermiculita que tienen estructura micácea.

La vermiculita es muy similar a la montmorillonita y algunas veces se considera como parte de esa familia de minerales arcillosos.

✓ Componentes inorgánicos de las arcillas¹⁰

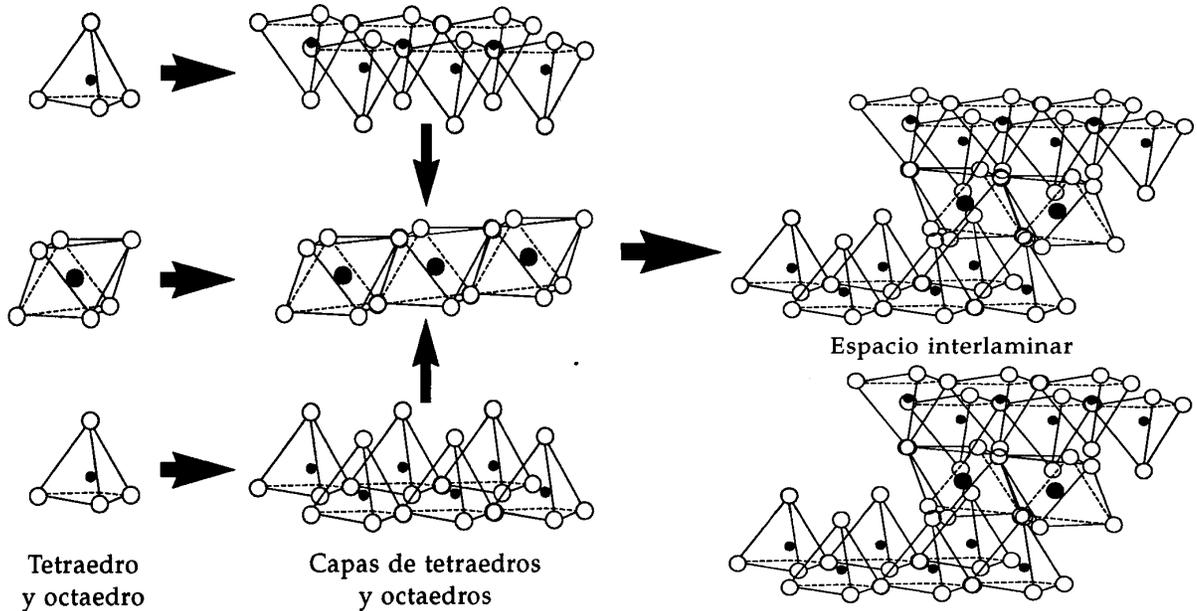
Los componentes inorgánicos del suelo se incluyen frecuentemente en dos grupos principales:

➤ Minerales primarios

Son parte del material original a partir del cual se formó el suelo. Se encuentran en las fracciones más gruesas del suelo, es decir, la arena y el limo.

¹⁰ Torres, Cruz Marina. Informe de Química sobre los ensayos realizados dentro de estudio de utilización de un polímero en la estabilización de suelos finos con cemento. Universidad del Cauca. Popayán. 2002.

Ilustración 12. Estructura de los minerales primarios



Fuente: Informe de Química

Se distinguen dos tipos de minerales primarios:

- ✓ Silicatos

Son los minerales más comunes de la corteza terrestre. Entre ellos se cuentan:

- Neosilicatos → como por ejemplo, olivino y zircón.
- Sorosilicatos → ejemplo, epidota y hemomorfito.
- Ciclosilicatos → el berilo y turmalina.
- Inosilicatos → entre ellos, hipersteno y augita.
- Filosilicatos → micas como la biotita, muscovita y lepidolita.
- Tectosilicatos → feldespatos como leucita, ortoclasa y nefelina.

- ✓ Minerales primarios diferentes a silicatos:

Compuestos por otro tipo de minerales, tales como óxidos y carbonatos. Aunque los fosfatos y sulfuros son minerales importantes, se presentan en pequeñas cantidades en la composición de las rocas.

Entre este grupo se encuentran óxidos como:

- Gibsita → asociación be-al-mg
- Pirolusita y magnetita → asociación Fe-Mn
- Ilmenita → asociación Ti-Nb (Ta)
- Grupo del cuarzo → óxidos no metálicos. Ejemplo, cristobalita.

Los carbonatos de calcio y magnesio son muy importantes en un número apreciable de suelos, especialmente en las regiones áridas, debido a que forman suelos de buena fertilidad

➤ **Minerales secundarios**

Son los minerales formados en el suelo. También se les conoce como minerales de arcilla, debido a su tamaño reducido. Están constituidos por partículas de tamaño coloidal, con diámetro promedio inferior a $2\mu\text{m}$.

Desde el punto de vista químico, es posible distinguir dos grandes grupos de sustancias dentro de estos minerales:

✓ Silicatos

Los cuales se subdividen en:

Silicatos laminares (filosilicatos): los cuales presentan una clasificación basada en su estructura. Según el número y clase de laminas que configuran el mineral se subdividen en cuatro subgrupos:

1. Minerales caoliníticos: son de tipo 1:1, ya que presentan una capa de tetraedros de sílice y una capa de tetraedros de aluminio. A este grupo pertenecen la Caolinita y la Halosita.
2. Minerales trimórficos: son los de tipo 2:1, consisten en una capa de octaedros de aluminio rodeada por dos capas de tetraedros de sílice. Dentro de este se distinguen dos subgrupos: las *esméticas* o minerales montmorilloníticos (como por ejemplo la Montmorillonita, Beidelita, Nontronita y Saponita) y las *micas hidratadas* (tales como la Illita y Vermiculita).
3. Minerales tetramórficos: o de tipo 2:1:1, ya que están compuestos por una capa de micas (2:1) y una capa octaédrica adicional de óxido hidratado. A este grupo pertenecen las Cloritas.
4. Minerales interestratificados: son el resultado de la unión de diferentes minerales de los grupos anteriores.

Silicatos fibrosos: estos minerales exhiben una estructura fibrosa bajo el microscopio electrónico.

Entre estos se conoce la Sepioilita y la Paligorskita (o atapulgita). Se presentan en suelos con pH alto. Su formación se facilita por la presencia de carbonatos y por la existencia de una adecuada salinidad del suelo.

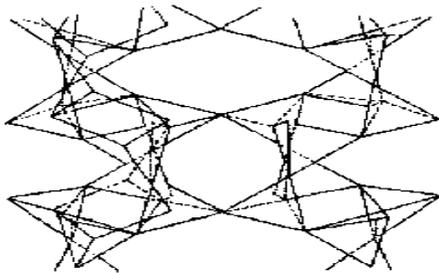
Silicatos amorfos: algunos suelos contienen en su fracción coloidal componentes amorfos. Se consideran amorfos aquellos constituyentes donde no es posible encontrar una estructura cristalina con los medios de investigación disponibles. A este grupo pertenecen tres minerales, la Alofana, la Imogolita y la Hissingerita.

➤ **Óxidos y óxidos hidratados en el suelo**

Son cinco los elementos que forman óxidos estables y relativamente frecuentes en los suelos: aluminio, hierro, manganeso, silicio y titanio.

Ilustración 13. Estructura de los minerales secundarios

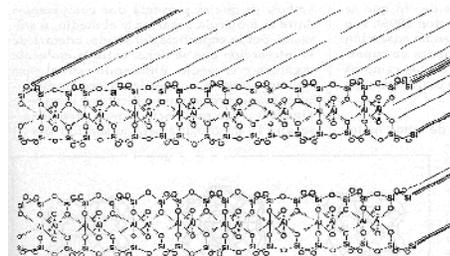
TECTOSILICATO ZEOLITAS
cristales volcanicos(devitrificación)



MENOS SUPERFICIE MENOS PUNTOS DE ADSORCION

Fuente: Informe de Química

FILOSILICATO
ILITAS/CLORITAS/BENTONITAS
Proceso de edafización (diagenesis)



MAS SUPERFICIE MAS PUNTOS DE ADSORCION

1. Oxidos de aluminio: por ejemplo, la Gibbsita.
2. Oxidos de hierro: como la Goethita, Hematita (la cual proporciona el color rojo a las arcillas que la contienen) y la Magnetita.
3. Oxidos de manganeso: ejemplo, pirolusita.
4. Oxidos de titanio: principalmente, Rutilo (TiO_2) e Ilmenita ($FeO.TiO_2$).
5. Oxidos de silicio: se presentan comúnmente en el suelo en forma de cuarzo de todos los tamaños, desde la arena hasta la arcilla.

✓ Análisis químico

Para la elaboración de los análisis químicos se siguió la siguiente metodología:

1. Medición del pH.
2. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.
3. Determinación de la presencia de Carbonatos.
4. Prueba del Grumo.
5. Determinación de Sulfatos, silicatos, alumina y oxido de hierro.
6. Caracterización química de los suelos.
7. Espectroscopia Infrarroja.

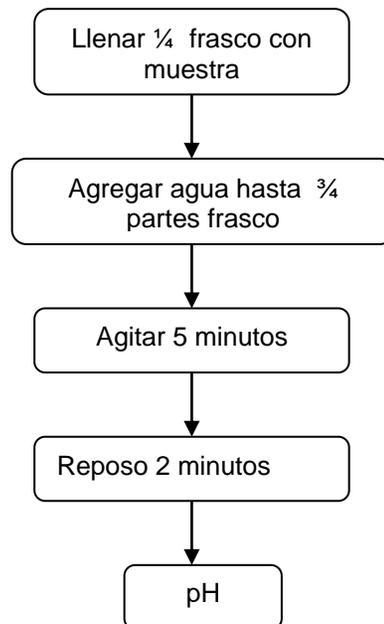
➤ Medición del pH

El pH se mide para determinar el grado de acidez o basicidad de los materiales. Para la estabilización de un suelo es determinante el valor del pH, de el depende la cantidad de estabilizante que se debe agregar.

✓ Metodología

Para la medición del pH en las diferentes muestras de suelo se realizó la siguiente metodología la cual corresponde a la norma ASTM D1512-60.

Ilustración 14. Metodología para la medición del pH



Este procedimiento se empleó para la medición del pH del suelo en su condición natural

✓ Resultados

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de la medición del pH en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 4. Datos de pH hallados para las muestras de suelo

Suelo N°	pH
1	5.40
2	5.56
3	5.54
4	4.95

Como se puede observar todos los suelos presentan un pH menor que 7, lo anterior indica que se trata de una solución ácida en la cual se forman zonas cargadas positivamente debido a la absorción de iones de hidrógeno en los bordes expuestos de las láminas octaédricas, debido a esto se presenta una menor capacidad de intercambio catiónico y el mineral se transforma en bipolar, es decir, las caras de la lámina quedan con una carga neta residual negativa debido a la sustitución isomórfica en el conjunto de láminas, mientras que los bordes quedan cargados positivamente debidos a la absorción de iones de hidrógeno.

El hecho de presentar pH menores de 7 permite inferir que la estabilización de dichos suelos es factible mediante el empleo de Cal o Cemento con el fin de elevar su pH y permitir la formación de agentes cementantes.

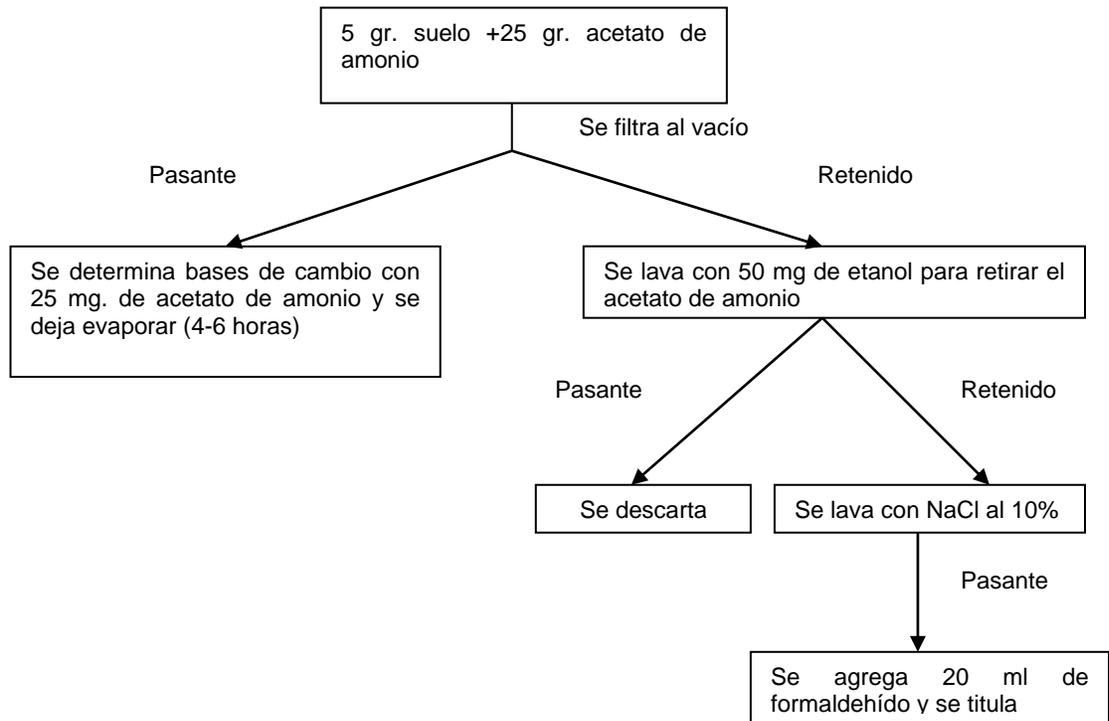
➤ **Determinación de la capacidad de intercambio catiónico**

La capacidad de intercambio catiónico o mancha catiónica es la determinación de los cationes presentes en el suelo (metales positivos). Es un método analítico que indica que cationes se pueden intercambiar cuando se estabiliza un suelo, donde los cationes más livianos se enciman y los más pesados se profundizan lo cual produce el intercambio entre unos y otros.

✓ Metodología

Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se empleó el método analítico recomendado por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Asosiation Oficial Analitical Chemistry (AOAC), el cual se muestra en la ilustración 15.

Ilustración 15. Metodología para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico



La titulación consiste en medir la cantidad de de iones intercambiables que tiene el material.

✓ Resultados

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la capacidad de intercambio catiónico en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 5. Datos de capacidad de intercambio catiónico hallados para las muestras de suelo

Suelo N°	Volumen Muestra	Humedad Muestra	Peso Muestra	C.C.C (meq / 100 gr)
1	6.8	7.184	5.061	23.054
2	3.4	6.155	5.050	11.342
3	4.6	5.980	5.039	16.300
4	6.6	9.879	5.071	25.295

CCC: Capacidad de intercambio catiónico

De acuerdo con los resultados de la capacidad de intercambio catiónico se trata de suelos minerales, los cuales normalmente presentan una capacidad de intercambio catiónico comprendida entre 3 y 35 meq / 100 gr.

En la tabla 6 se muestra los valores típicos de capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos, en la cual se puede apreciar que los suelos estudiados no presentan pureza en sus minerales arcillosos y su comportamiento indican la mezcla de caolinitas con otros minerales.

Tabla 6. Capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos

Grupo	C.C.C. (meq / 100 gr)
Caolín	3 a 8
Ilitas	40
Montmorilonitas	80

Fuente: "Mejoramiento y Estabilización de suelos", Carlos Fernández Loaiza (1982)

➤ **Determinación de la presencia de carbonatos**

Los carbonatos se determinan mediante pruebas de análisis inmediato que es la caracterización básica para toda clase de materiales en este caso el suelo.

✓ **Metodología**

Para la determinación de la presencia de carbonatos en las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología mostrada en la Ilustración 16, la cual es recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Asosiation Oficial Analitical Chemistry (AOAC).

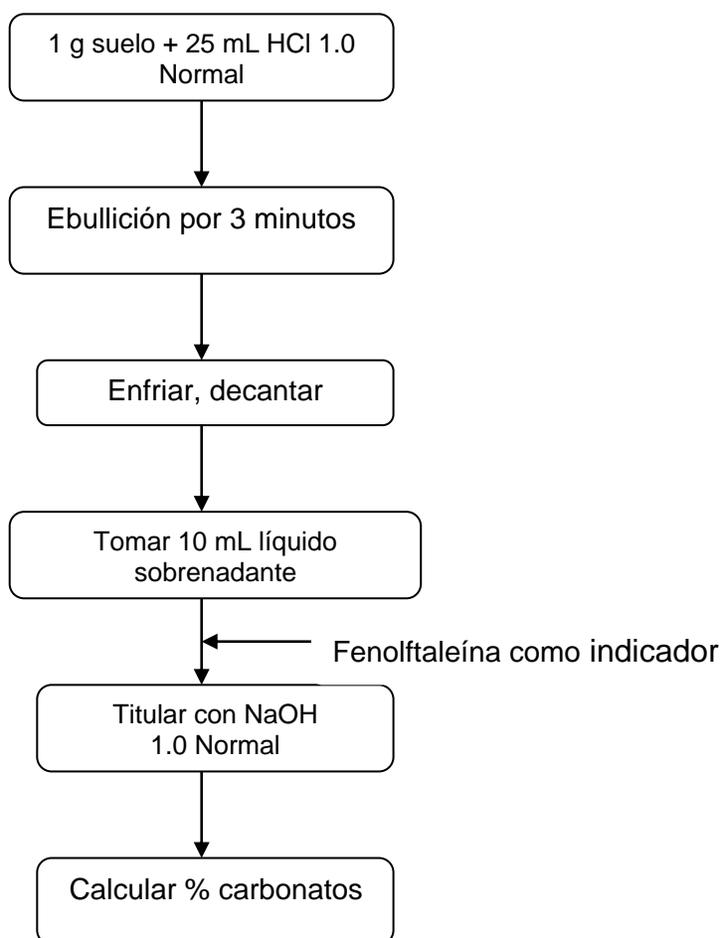
✓ Resultados

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la medición de carbonatos en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 7. Resultados obtenidos con las muestras de suelo en la prueba de carbonatos

Muestra	Carbonatos
1	Trazas
2	Trazas
3	Trazas
4	Trazas

Ilustración 16. Metodología para la determinación de la presencia de Carbonatos



La cantidad de carbonatos se calculan de conformidad con la siguiente expresión

$$\% \text{ de carbonatos} = 5 * (25 \text{ ml HCl} - \text{Cantidad de hidróxido}) / 25$$

Se observa que todos los suelos presentan trazas de la presencia de carbonatos como uno de sus compuestos, lo cual resulta favorable ya que estos permiten la formación de agentes cementantes.

➤ Prueba del Grumo

Es un método analítico para identificar los minerales del suelo y en forma muy aproximada los tipos de minerales, lo cual sirve para la clasificación de los suelos con fines ingenieriles.

✓ Metodología

Para la prueba del grumo en las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Asosiation Oficial Analitical Chemistry (AOAC), la cual se muestra en la ilustración 17.

✓ Resultados

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba del grumo en las diferentes muestras de suelo.

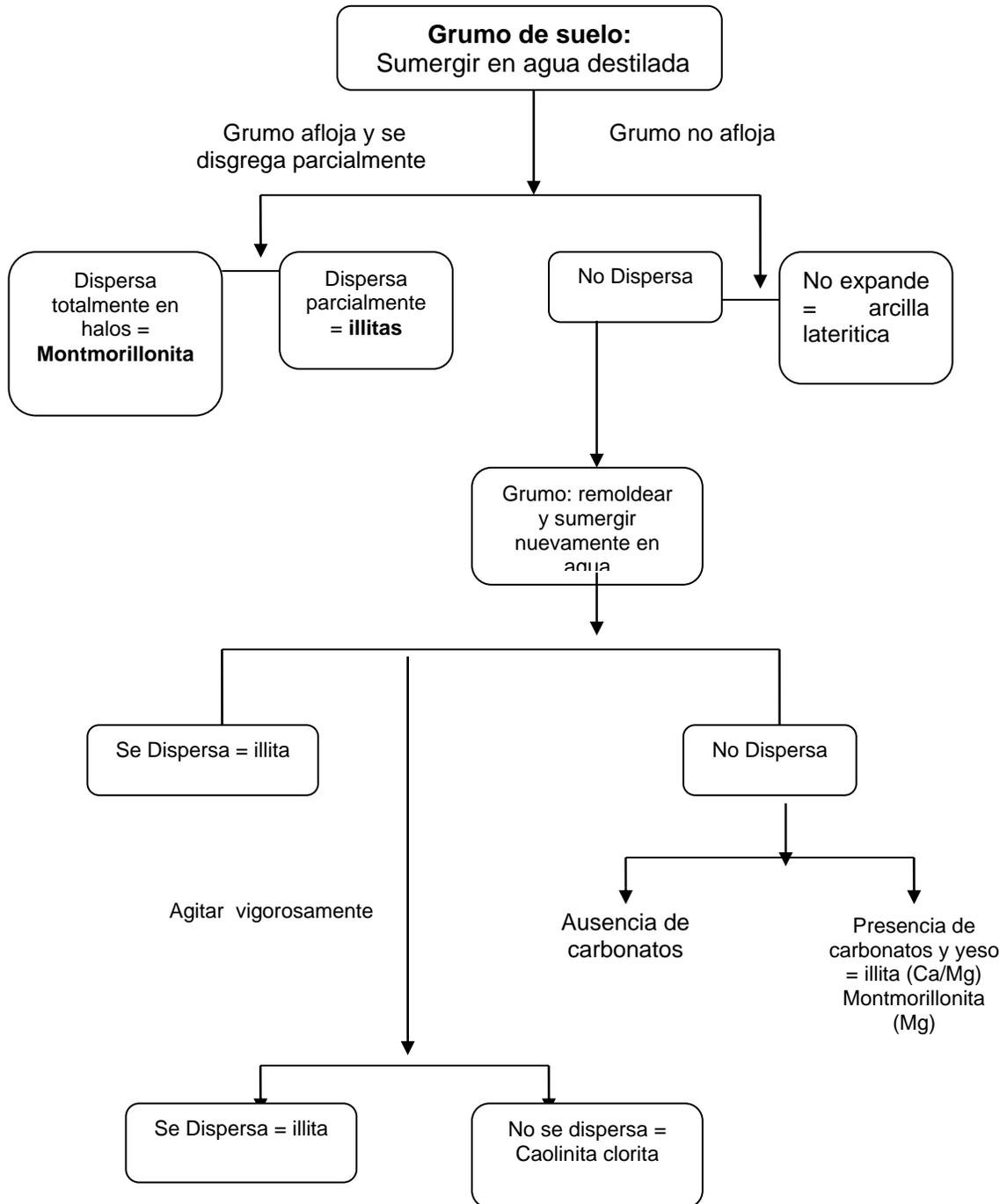
Tabla 8. Resultados obtenidos en la prueba del grumo

Muestra	Tipo de mineral
1	Ilita-caolinita-clorita
2	Montmorillonita
3	Montmorillonita
4	Ilita-caolinita

De acuerdo con los resultados de la prueba del grumo se confirma que los suelos 1 y 4 están formados por la mezcla de varios minerales arcillosos y se puede observar que el comportamiento de los suelos 2 y 3 corresponde al de una Montmorillonita. Estos resultados son un poco extraños ya que los suelos 2 y 3 son los que presentan una menor capacidad de intercambio cationico lo que es característico de suelos formados por minerales de caolinita, lo anterior hace pensar en la presencia de otros minerales arcillosos. Por lo tanto esta prueba del

grumo no es confiable para la determinación de los minerales arcillosos de un suelo.

Ilustración 17. Metodología para la prueba del grumo



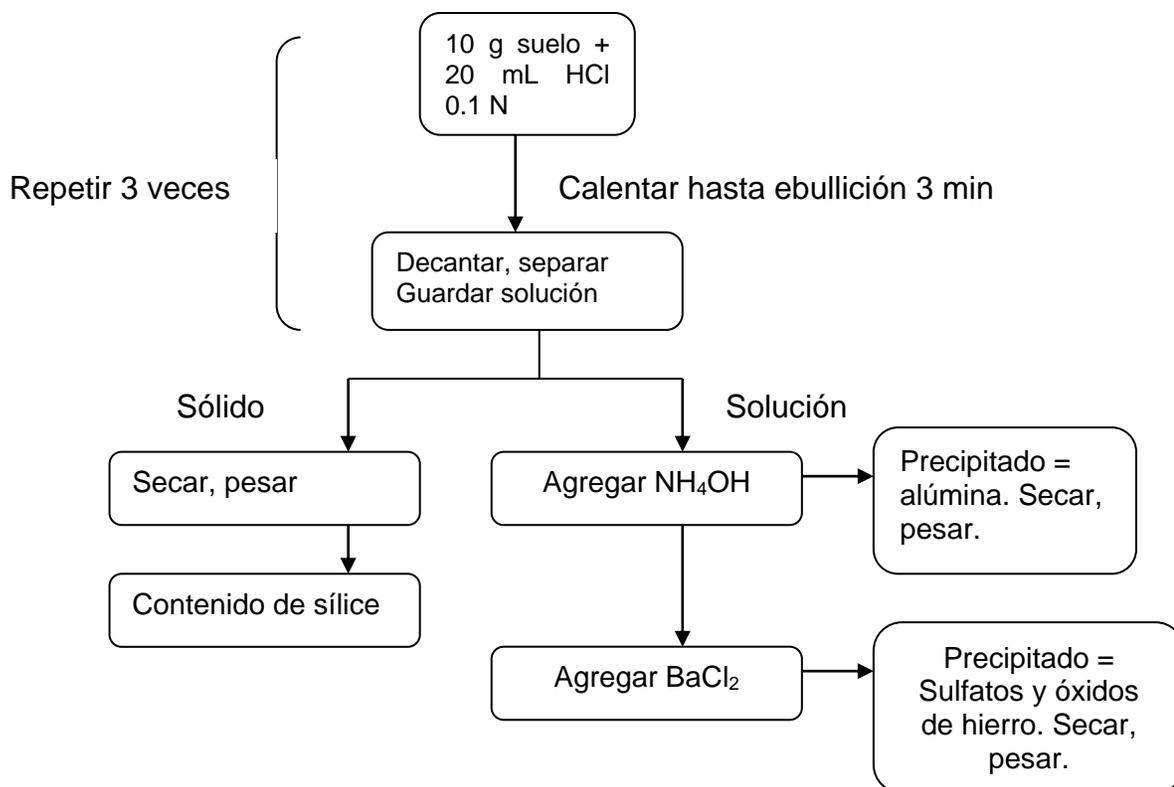
➤ **Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro**

Los sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro se determinan mediante pruebas de análisis inmediato que es la caracterización básica para toda clase de materiales en este caso el suelo.

✓ **Metodología**

Para la determinación de los Sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro en las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Asosiation Oficial Analitical Chemistry (AOAC), la cual se muestra en la ilustración 18.

Ilustración 18. Metodología para la determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro



✓ **Resultados**

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en la determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 9. Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro

Muestra	Peso muestra (gramos)	Silice		Alumina, oxido de hierro y sulfatos	
1	1.006	0.484	48.4%	0.522	52.2%
2	1.000	0.308	30.8%	0.692	69.2%
3	1.002	0.301	30.1%	0.701	70.1%
4	1.004	0.373	37.3%	0.631	63.1%

➤ **Caracterización química de los suelos**

✓ **Metodología**

Para la caracterización química de las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Asosiation Oficial Analitical Chemistry (AOAC), la cual se muestra en la ilustración 19.

✓ **Resultados**

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización química de las diferentes muestras de suelo.

Tabla 10. Caracterización química de los suelos

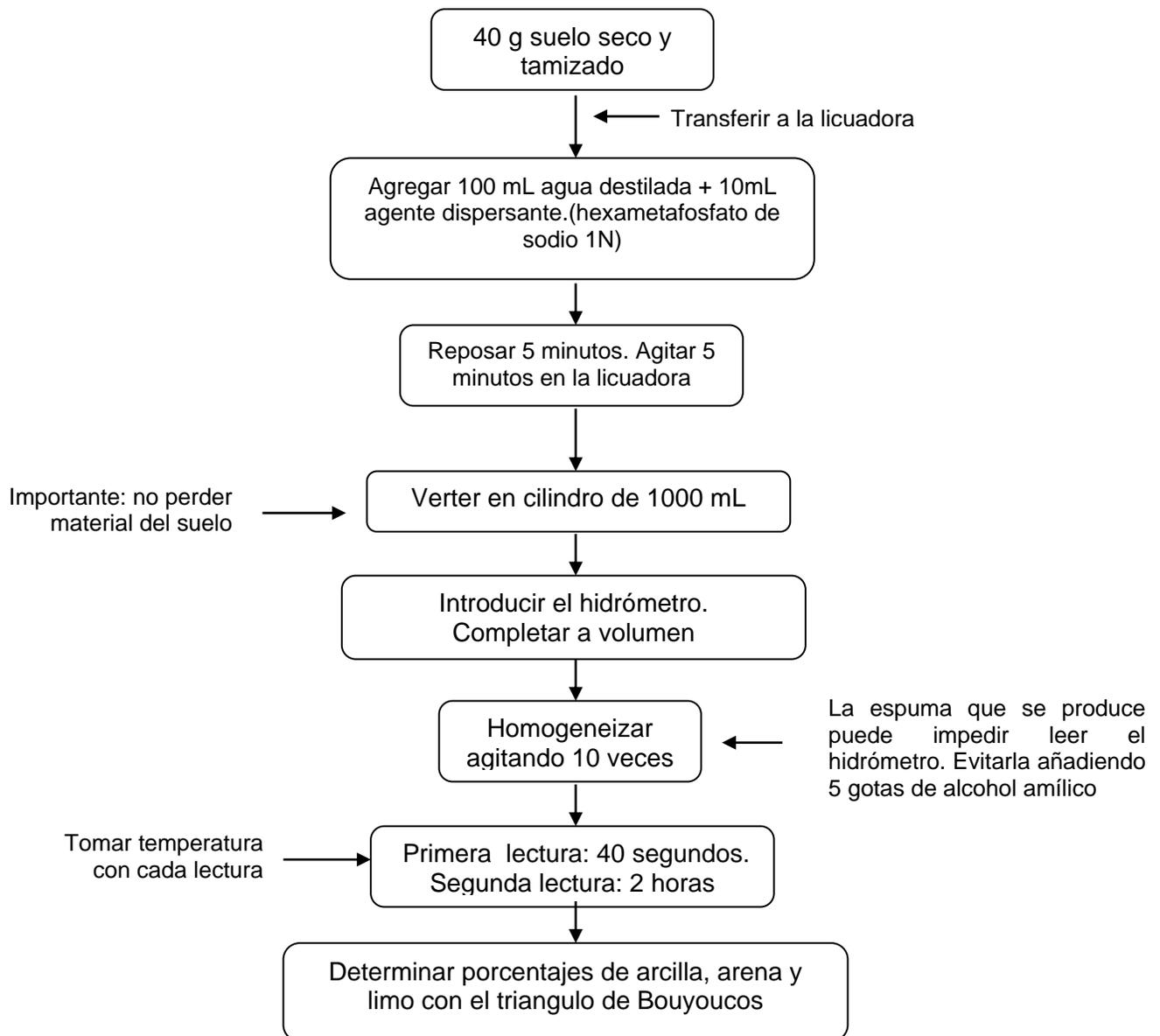
SUELO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	TIPO DE SUELO
1	37.9	22.4	39.6	Franco arcilloso
2	35.8	45.9	18.2	Franco (limoso)
3	81.7	17.5	0.8	Franco arenoso
4	30.5	28.3	41.3	Arcilloso

➤ **Espectroscopia Infrarroja**

Los métodos espectroscópicos son un conjunto de técnicas analíticas que se basan en la medición de la absorción o emisión de radiaciones electromagnéticas por resonancia en un sistema constituido por átomos o núcleos. La espectroscopia infrarroja analiza selectivamente la absorción de radiación infrarroja de una sustancia o material. El análisis de los espectros de absorción infrarroja producen información sobre la estructura de las moléculas, lo cual facilita la distinción de minerales y dentro de una serie isomorfica permite el análisis de las arcillas y la materia orgánica de suelos como un todo sin necesidad de separarlas.

Los espectros infrarrojos suelen registrarse en cm^{-1} , el espectro infrarrojo suministra información acerca de los enlaces hidroxílicos en las laminas de agua intercala de los minerales arcillosos. Este es un método inigualable en el análisis de la orientación polar de moléculas orgánicas absorbidas sobre la superficie de los minerales arcillosos.

Ilustración 19. Metodología para la caracterización química del suelo (método de Bouyoucos)



Actualmente para la interpretación de los espectros infrarrojos se han desarrollado archivos digitales de espectros de minerales arcillosos y otros tipos de suelos y/o materiales algunos con rutinas incorporadas al equipo obtenibles con las casas de fabricantes y distribuidores de espectrofotómetros infrarrojos.

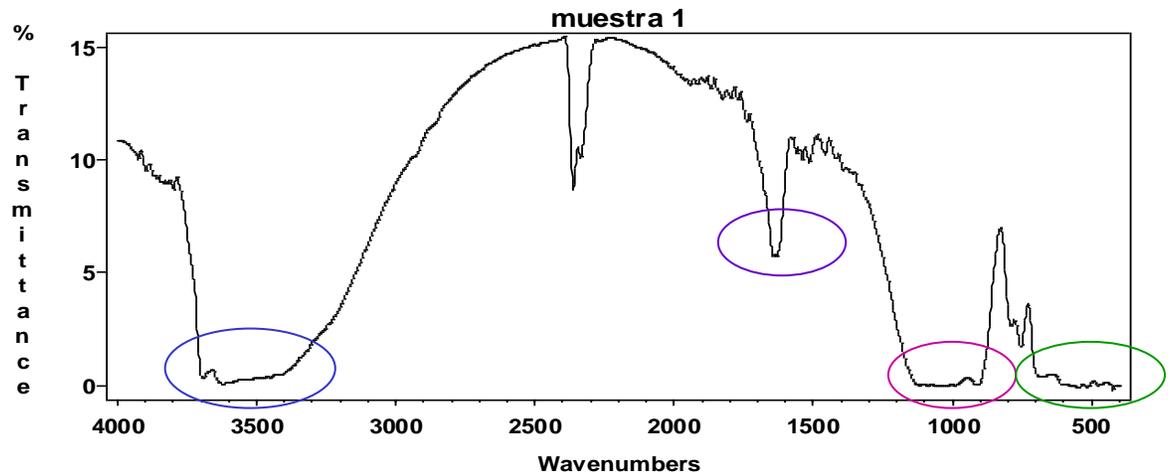
✓ Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 1

La ilustración 20 muestra el espectro infrarrojo perteneciente a la muestra de suelo 1.

En este espectro se encuentran las siguientes absorciones:

Pico en 3693 cm^{-1} correspondiente a vibraciones de grupos OH de minerales caoliníticos. Se encuentra unido a éste un conjunto de bandas amplias entre 3630 y 3450 cm^{-1} que se atribuyen a vibraciones de grupos OH de minerales arcillosos como montmorillonitas, cloritas, caolinitas, halloisitas, gibsitas, vermiculitas y biotitas, entre otros.

Ilustración 20. Espectro infrarrojo de la muestra de suelo 1



- Banda aguda en 1636 cm^{-1} debida a las vibraciones de los grupos funcionales (OH) de sustancias húmicas y vibraciones deformacionales de moléculas de agua, en minerales arcillosos.
- Absorciones múltiples que conforman una banda ancha ubicada entre 1119 y 910 cm^{-1} , se asignan a vibraciones valenciales de grupos SiO en minerales como: montmorillonitas, cloritas, caolinitas, halloisitas, gibsitas, vermiculitas y biotitas, muscovitas entre otros.
- 2 bandas alrededor de 790 y 750 cm^{-1} atribuidas a vibraciones de deformación Si-O en minerales como caolinita y muscovita.

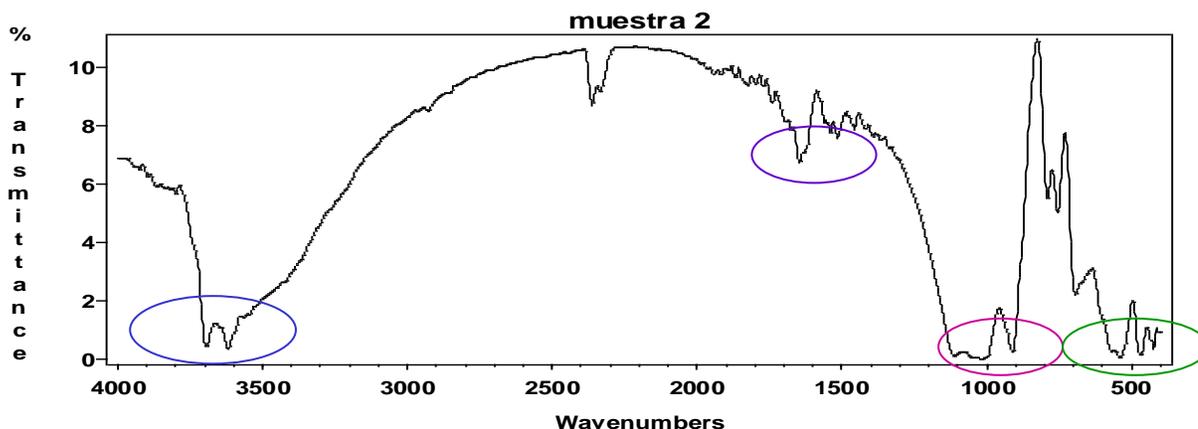
- Una serie de picos entre 605 y 430 cm^{-1} conforman una amplia zona de absorción característica de vibraciones de deformación de grupos funcionales como: Si-O, Si-O-(Al, Mg) y Si-O-Me, en minerales como cuarzo, caolinita, halloisita, Montmorillonita, muscovita, nontronita, biotita, clorita, mica, entre otros, además de evidenciar la presencia del grupo SO_4 del yeso.

Mediante el análisis de este espectro, y teniendo en cuenta los resultados de la prueba de grumos contenidos en la tabla 3, se puede afirmar que este suelo presenta las características de un mineral arcilloso de tipo **caolinita-clorita-illita**, con rasgos de Montmorillonita y gibsita, entre otros. La presencia de características de ciertas micas hidratadas, como la vermiculita, confirma que esta muestra de suelo contiene illita, mineral con el cual está estrechamente relacionada.

✓ Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 2

El espectro infrarrojo de la muestra 2 se aprecia en la ilustración 21

Ilustración 21. Espectro infrarrojo de la muestra de suelo 2



En este espectro aparecen las siguientes absorciones características:

- Dos bandas agudas en 3690 y 3620 cm^{-1} que se atribuyen a vibraciones del grupo OH de minerales tipo caolinita - Montmorillonita -clorita – halloisita.
- En 1646 cm^{-1} se encuentra un pico de mediana intensidad que corresponde a minerales arcillosos tipo Montmorillonita.
- En los espectros de minerales arcillosos tipo Montmorillonita es característico encontrar un hombro alrededor de 1200-1120 cm^{-1} asociado al máximo en 1060

cm^{-1} , como sucede en el espectro analizado. Se debe a las vibraciones del grupo Si-O.

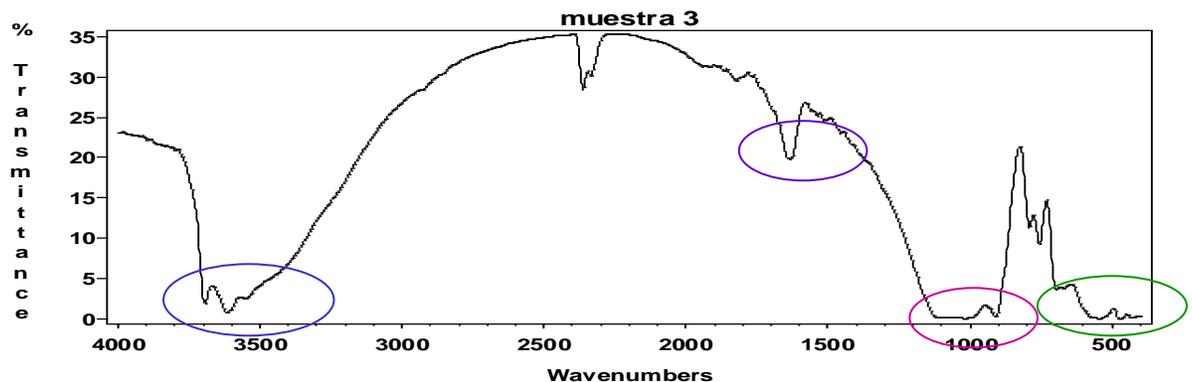
- Dos picos pequeños entre 800 y 750 cm^{-1} típicos de vibraciones de deformación del grupo Si-O en minerales como Montmorillonita, caolinita, cristobalita, y muscovita. Igualmente, a este tipo de vibración en minerales como cuarzo, caolinita y talco, corresponde la absorción ubicada en 693 cm^{-1} .
- Absorción en 540 cm^{-1} debidas a vibraciones de deformación de grupos Si-O-(Al, Mg) en minerales tipo Montmorillonita, caolinita y halloisita.
- Dos bandas por debajo de 470 cm^{-1} , correspondientes a vibraciones del grupo funcional Si-O en minerales como cuarzo, caolinita, clorita, muscovita y Montmorillonita.

El análisis de este espectro en conjunto con el resultado encontrado con la prueba de grumos para esta muestra de suelo, sugiere que se trata de un mineral arcilloso tipo **Montmorillonita**, con presencia de otros tipos de minerales como caolinitas, cuarzo, cloritas y halloisitas, entre otros.

✓ Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 3

El espectro de la ilustración 22 corresponde a la muestra de suelo 3.

Ilustración 22. Espectro infrarrojo de la muestra de suelo 3



En este espectro se encuentran las siguientes bandas representativas:

- Entre 3693 y 3552 cm^{-1} se encuentran bandas anchas que son características del grupo OH presente en algunos minerales arcillosos tipo caolinita, Montmorillonita, halloisitas, cloritas, vermiculitas, entre otros.

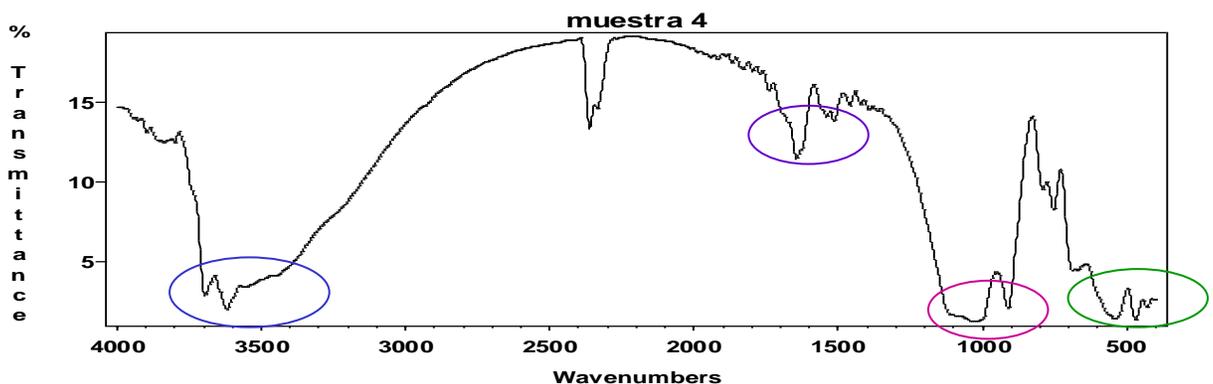
- En 1631 cm^{-1} se presenta una absorción aguda que se atribuye a grupos H-O-H en puentes de agrupamiento de tipo C-O en sustancias húmicas.
- Alrededor de 1127 a 984 cm^{-1} se presenta una banda ancha y aguda que corresponde posiblemente a los grupos Si-O presentes en caolinitas y montmorillonitas principalmente. Cercana a esta se encuentra en 909 cm^{-1} un pico que se atribuye al mismo grupo Si-O de minerales caoliníticos. En toda esta región es frecuente hallar absorciones debidas a caolinitas y montmorillonitas, las cuales pueden ser confusas debido a que se solapan entre si.
- Un doblete en 790 y 754 cm^{-1} característico del grupo Si-O de las caolinitas y montmorillonitas.
- Por debajo de 690 cm^{-1} se encuentran otras absorciones debidas a grupos Si-O enlazados con otros elementos (por ejemplo, aluminio), en minerales tipo caolinita, halloisita, cuarzo, Montmorillonita, entre otros.

Reuniendo el análisis espectroscópico con los resultados de la prueba de grumos, la muestra de suelo 3 presenta características de mineral **caolinítico-montmorillonítico**, además posee rasgos de otros tipos de arcillas, como por ejemplo, halloisita, clorita y vermiculita.

✓ Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 4

El espectro de la ilustración 23 corresponde a la muestra de suelo 4.

Ilustración 23. Espectro infrarrojo de la muestra de suelo 4



En él se pueden distinguir algunas absorciones representativas, por ejemplo:

- Entre 3694 y 3400 cm^{-1} una serie de bandas que unidas forman un amplio conjunto que es característico de los grupos OH de caolinitas, montmorillonitas, cloritas y halloisitas.
- En 1645 cm^{-1} se ubica un pico agudo que corresponden a grupos H-O-H en puentes de agrupamiento de tipo C-O en sustancias húmicas.
- Alrededor de 1086 y 1036 cm^{-1} dos bandas bien unidas se pueden atribuir a grupos Si-O de caolinita, halloisita, Montmorillonita, cuarzo, nontronita y muscovita.
- En 911 cm^{-1} la absorción se debe a grupos Al-OH...O en caolinitas, halloisitas y montmorillonitas.
- Las múltiples bandas que aparecen por debajo de 800 cm^{-1} se pueden asignar a vibraciones de deformación del grupo Si-O y enlazado Si-O-Me, (Al, Mg) ^{IV} de minerales como cristobalita, caolinita, Montmorillonita, cuarzo, talco y saponita, entre otros.

Estos resultados indican que la muestra de suelo puede corresponder a una **caolinita**, y la prueba del grumo señala que además presenta características de mineral tipo caolinita-clorita.

2.2. ESTABILIZANTES

2.2.1. Cal¹¹

✓ Generalidades

La Cal aérea es el producto resultante de la descomposición de las rocas calizas por acción del calor.

Al someter una roca caliza pura (Carbonato de calcio, CaCO_3) a temperaturas superiores a los 900°C se produce anhídrido carbónico (CO_2) el cual es gaseoso y óxido de calcio o cal viva (CaO).

La cal viva es un producto sólido, de color blanco y aparentemente amorfo ya que se cristaliza cuando se funde a temperaturas superiores a 2570°C. Este es un material altamente inestable que presenta una gran avidez por el agua.

¹¹ RIVERA LOPEZ, Gerardo A. Concreto simple, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Popayán, 1992.

Cuando la Cal viva (CaO) obtiene agua esta se transforma el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y libera una gran cantidad de calor. El Hidróxido de calcio es un cuerpo sólido, blanco, amorfo y algo soluble en agua.

Cuando el hidróxido de calcio es mezclado con pequeñas cantidades de agua forma una masilla blanca que tiene la propiedad de endurecerse lentamente en el aire, enlazando de esta manera los cuerpos sólidos lo que lo convierte en un material aglomerante.

El endurecimiento del hidróxido de calcio recibe el nombre de fraguado y se debe inicialmente a un secado por evaporación del agua con la que se formó la pasta, y después, a una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire, formando carbonato de calcio (CaCO_3) y agua. Esta reacción es muy lenta ya que empieza después de 24 horas de realizar la mezcla y se demora más de 6 meses.

La reacción se realiza solo cuando la humedad relativa del aire es baja, con humedades relativas del aire altas es muy difícil que esta se presente y en el agua definitivamente no se da ya que la cal se disuelve.

✓ **Clasificación de la cal**

El carbonato de calcio en su estado natural casi nunca se encuentra puro, dado que las calizas están formadas además por otros compuestos químicos como son arcilla, magnesio, hierro, azufre, álcalis y materias orgánicas, las cuales al ser calcinadas pueden volatizarse o introducirle a la cal propiedades que dependen de la proporción de los minerales que hacían parte de la caliza.

Teniendo en cuenta lo anterior las cales se clasifican de la siguiente manera:

Cal Grasa: son las que se forman cuando la caliza contiene hasta un 5% de arcilla, tienen las siguientes propiedades:

- ✓ Al apagarse forma una pasta fina blanca y untuosa que aumenta mucho su volumen.
- ✓ Permanece indefinidamente blanda en sitios húmedos y fuera del contacto del aire.
- ✓ En el agua se disuelve.

Cales áridas o magras: son las que se forman cuando la caliza contiene menos del 5% de arcilla y además existe la presencia de magnesio en proporciones superiores al 10%, tienen las siguientes propiedades:

- ✓ Al añadirsele agua se forma una pasta que endurece menos y desprende más calor que las cales grasas.
- ✓ Al secarse en el aire se reduce a polvo.
- ✓ En el agua se deslien y disuelven.

Esta cal no se usa en construcción debido a sus malas cualidades.

Cales hidráulicas: son las que se forman cuando la caliza contiene más del 5% de arcilla, tienen las siguientes propiedades:

- ✓ Al apagarse forma una pasta fina blanca y untuosa que aumenta mucho su volumen.
- ✓ Puede endurecer y consolidar en sitios húmedos y debajo del agua.

2.2.2. Cemento Portland

✓ Generalidades

El cemento se presenta en forma de un polvo finísimo, de color gris que, mezclado con agua, forma una pasta que endurece tanto bajo agua como al aire. Por la primera de estas características y por necesitar agua para su fraguado se le define como un aglomerante hidráulico.

Es obtenido mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas: una caliza, con un alto contenido de cal en forma de óxidos de calcio, y un componente rico en sílice, constituido normalmente por arcilla o eventualmente por una escoria de alto horno.

Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio, del cual se obtiene un material granular denominado clínquer, constituido por 4 compuestos básicos:

- ✓ Silicato Tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$), designado como C_3S .
- ✓ Silicato bicálcico ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$), designado como C_2S .
- ✓ Aluminato tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), designado como C_3A .
- ✓ Ferroaluminato tetracálcico ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), designado como C_4AF .

Estos se presentan en forma de cuatro fases mineralizadas, en conjunto con una fase vítrea, integrada por los dos últimos. Estas fases constituyen un 95% del peso total del clínquer, siendo el 5 % restante componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros.

El clínquer es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de

yeso alrededor de un 5 % de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, la que de otra manera endurecería en forma casi instantánea. El cemento así obtenido se denomina cemento Pórtland.

Durante la molienda se puede adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los cementos pórtland con adiciones o especiales, los que, junto con mantener las propiedades típicas del Pórtland puro (fraguado y resistencia), poseen además, otras cualidades especialmente relacionadas con la durabilidad, resistencia química y otras. Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están las puzolanas, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas de alto horno.

Estas adiciones presentan una reactividad química potencial, que se activa durante la hidratación del clínquer a temperatura ambiente. Así las puzolanas y cenizas volantes reaccionan con la cal hidratada liberada durante la hidratación de los componentes activos del clínquer. En cambio, en el caso de las escorias este efecto se produce porque la cal hidratada liberada desencadena la reacción de los componentes de la escoria, similares a los existentes en el clínquer.

✓ **Fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento**

El cemento al ser mezclado con agua forma una pasta, que tiene la propiedad de rigidizarse progresivamente hasta constituir un sólido de creciente dureza y resistencia.

Estas características son causadas por un proceso físico-químico derivado de la reacción química del agua con las fases mineralizadas del clínquer y que en su primera etapa incluye la solución en agua de los compuestos anhidros del cemento, formando compuestos hidratados. Los compuestos del cemento se hidratan a distinta velocidad, iniciándose con el C_3A y continuando posteriormente con C_4AF , C_3S y C_2S en ese mismo orden.

A partir de ese momento el proceso no es cabalmente conocido, existiendo teorías que suponen la precipitación de los compuestos hidratados, con la formación de cristales entreverados entre sí que desarrollen fuerzas de adherencia, las que producen el endurecimiento de la pasta (Teoría cristaloidal de Le Chatelier) o alternativamente por el endurecimiento superficial de un gel formado a partir de dichos compuestos hidratados (Teoría coloidal de Michaelis), estimándose actualmente que el proceso presenta características mixtas.

El endurecimiento de la pasta de cemento muestra particularidades que son de interés para el desarrollo de obras de ingeniería:

- ✓ La reacción química producida es exotérmica, con desprendimiento de

- ✓ calor, especialmente en los primeros días.
- ✓ Durante su desarrollo se producen variaciones de volumen, de dilatación si el ambiente tiene un alto contenido de humedad o de contracción si este es bajo.

El proceso producido es dependiente de las características del cemento, principalmente de su composición y de su finura, los cuales condicionan en especial la velocidad de su generación.

✓ **Tipos de Cemento portland**¹²

Dependiendo de la composición química del cemento este presenta variaciones en sus propiedades que permiten diferenciarlo de los demás, de acuerdo a eso se presentan los siguientes tipos de cemento:

- ✓ **Cemento Portland Tipo I:** es el destinado a obras de hormigón en general al que no se le exigen propiedades especiales.

Para efectos de esta investigación se utilizó este tipo de cemento teniendo en cuenta que es el de mayor producción nacional y por ende el de más fácil consecución en grandes cantidades.

- ✓ **Cemento Portland Tipo I - M:** es el destinado a obras de hormigón en general al que no se exigen propiedades especiales, pero presenta mayores resistencias que las del tipo 1.
- ✓ **Cemento Portland Tipo II:** tiene la propiedad de presentar una moderada resistencia al ataque de los sulfatos, además de presentar un mayor calor de hidratación.
- ✓ **Cemento Portland Tipo III:** presenta altas resistencias iniciales.
- ✓ **Cemento Portland Tipo IV:** presenta bajo calor de hidratación.
- ✓ **Cemento Portland Tipo V:** presenta alta resistencia a la acción de los sulfatos.

¹² RIVERA LOPEZ, Gerardo A. Concreto simple, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Popayán, 1992.

2.2.3. Polímeros

✓ Generalidades

➤ Introducción

La materia en general está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones. algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran significación comercial como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de hevea y de los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que se usan en la vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen.

✓ Fuerzas de atracción intermolecular

Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases:

✓ Fuerzas de Van der Waals

También llamadas fuerzas de dispersión, presentes en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios: como resultado de los movimientos de electrones, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente. Así se forman dipolos no-permanentes. Estos dipolos producen atracciones electroestáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros, formados por miles de estas pequeñas moléculas, las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes, como en el caso del polietileno.

En la tabla 11 se observa como cambian la densidad y la temperatura de fusión, al aumentar el número de átomos de carbono en la serie de Iso hidrocarburos. Los compuestos más pequeños son gases a la temperatura ambiente, al aumentar progresivamente el número de carbonos, los compuestos se vuelven líquidos y luego sólidos, cada vez con mayor densidad y mayor temperatura de fusión, hasta llegar a los polietilenos con densidades que van de 0,92 a 0,96 g/cm³ y temperaturas de fusión entre 105 y 135° C.

Tabla 11. Densidad y temperatura de fusión de hidrocarburos

Hidrocarburo	Fórmula	Peso molecular	Densidad (gr/cm ³)	T. de fusión (°C)
Metano	CH ₄	16	gas	-182
Etano	C ₂ H ₆	30	gas	-183
Propano	C ₃ H ₈	44	gas	-190
butano	C ₄ H ₁₀	58	gas	-138
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	0,63	-130
Hexano	C ₆ H ₁₄	86	0,66	-95
Heptano	C ₇ H ₁₆	100	0,68	-91
Octano	C ₈ H ₁₈	114	0,70	-57
Nonano	C ₉ H ₂₀	128	0,72	-52
Decano	C ₁₀ H ₂₂	142	0,73	-30
Undecano	C ₁₁ H ₂₄	156	0,74	-25
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170	0,75	-10
Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	212	0,77	10
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	283	0,79	37
Triacontano	C ₃₀ H ₆₂	423	0,78	66
Polietileno	C ₂₀₀₀ H ₄₀₀₂	28000	0,93	100

✓ Fuerzas de atracción

Debidas a dipolos permanentes, como en el caso de los poliésteres. Estas atracciones son mucho más potentes y a ellas se debe la gran resistencia tensil de las fibras de los poliésteres.

✓ Enlaces de hidrógeno

Como en las poliamidas (nylon). Estas interacciones son tan fuertes, que una fibra obtenida con estas poliamidas tiene resistencia tensil mayor que la de una fibra de acero de igual masa.

✓ Otras fuerzas de atracción

Hay atracciones de tipo iónico que son las más intensas. Un ejemplo sería el copolímero etileno-ácido acrílico, que al ser neutralizado con la base $M(OH)_2$, producirá la estructura indicada. Estos materiales se llaman ionómeros y se usan, por ejemplo, para hacer películas transparentes de alta resistencia.

La fuerza total de atracción entre las moléculas del polímero, dependería del número de las interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace según la tabla, multiplicada por el número de átomos de carbono en el caso del polietileno o por el número de carbonílicos $C=O$ en los poliésteres, etc, rara vez se alcanza este valor máximo, porque las cadenas de los polímeros no pueden, por lo general, acomodarse con la perfección que sería requerida.

Tabla 12. Energía requerida para romper cada enlace

Tipo de enlace	Kcal / mol
Van der Waals en CH_4	2,4
Dipolos permanentes	3 a 5
Enlaces hidrógeno	5 a 12
Iónicos	mayores a 100

➤ **Concepto y clasificación**

Un polímero (del griego *poly*, muchos; *meros*, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero. Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámero, pentámero y sucesivos. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades. De este modo, el trióximetileno, es el trímero del formaldehído, por ejemplo.

Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión gran polímero. Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas la misma composición química y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todas el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros. Estas variedades en general no suelen afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos.

Los polímeros se pueden clasificar por varios aspectos:

- ✓ Clasificación de polímeros por su forma

Polímeros isómeros

Los polímeros isómeros son polímeros que tienen esencialmente la misma composición de porcentaje, pero difieren en la colocación de los átomos o grupos de átomos en las moléculas. Los polímeros isómeros del tipo vinilo pueden diferenciarse en las orientaciones relativas (cabeza a cola, cabeza a cabeza, cola a cola, o mezclas al azar de las dos.) de los segmentos consecutivos (unidades monómeras.)

Concepto de tacticidad

El término tacticidad se refiere al ordenamiento espacial de las unidades estructurales.

El mejor ejemplo es el polipropileno, que antes de 1.955 no tenía ninguna utilidad. En ese año, Giulio Natta en Milán, utilizó para hacer polipropileno, los catalizadores que Karl Ziegler había desarrollado para el polietileno. Esos catalizadores, hechos a base de cloruro de titanio y tri-*n*-alquil-aluminio, *acomodan* a los monómeros de tal manera que todos los grupos metilos quedan colocados del mismo lado en la cadena.

En esta forma, Natta creó el polipropileno *isotáctico*, que tiene excelentes propiedades mecánicas. Hasta ese momento, con los procedimientos convencionales, sólo se había podido haer polímeros *atácticos*, sin regularidad estructural.

El polipropileno atáctico es un material ceroso, con pésimas propiedades mecánicas.

Otros catalizadores permiten colocar los grupos alternadamente, formando polímeros que se llaman sindiotácticos, los cuales, como los isotácticos, tienen muy buenas propiedades.

Homopolímeros y copolímeros

Los materiales como el polietileno, el PVC, el polipropileno, y otros que contienen una sola unidad estructural, se llaman homopolímeros. Los homopolímeros, además, contienen cantidades menores de irregularidades en los extremos de la cadena o en ramificaciones.

Por otro lado los copolímeros contienen varias unidades estructurales, como es el caso de algunos muy importantes en los que participa el estireno.

Estas combinaciones de monómeros se realizan para modificar las propiedades de los polímeros y lograr nuevas aplicaciones. Lo que se busca es que cada monómero imparta una de sus propiedades al material final; así, por ejemplo, en el ABS, el acrilonitrilo aporta su resistencia química, el butadieno su flexibilidad y el estireno imparte al material la rigidez que requiera la aplicación particular.

Evidentemente al variar la proporciones de los monómeros, las propiedades de los copolímeros van variando también, de manera que el proceso de copolimerización permite hasta cierto punto fabricar polímeros a la medida.

No solo cambian las propiedades al variar las proporciones de los monómeros, sino también al variar su posición dentro de las cadenas. Así, existen los siguientes tipos de copolímeros.

Las mezclas físicas de polímeros, que no llevan uniones permanentes entre ellos, también constituyen a la enorme versatilidad de los materiales poliméricos. Son el equivalente a las *aleaciones metálicas*.

En ocasiones se mezclan para mejorar alguna propiedad, aunque generalmente a expensas de otra. Por ejemplo, el óxido de polifenilo tiene excelente resistencia térmica pero es muy difícil procesarlo. El poliestireno tiene justamente las propiedades contrarias, de manera que al mezclarlos se gana en facilidad de procedimiento, aunque resulte un material que no resistirá temperaturas muy altas.. Sin embargo en este caso hay un efecto sinérgico, en el sentido en que la resistencia mecánica es mejor en algunos aspectos que a la de cualquiera de los dos polímeros. Esto no es frecuente, porque puede ocurrir únicamente cuando existe perfecta compatibilidad ente los dos polímeros y por regla general no la hay,

así que en la mayoría de los casos debe agregarse un tercer ingrediente para compatibilizar la mezcla. Lo que se emplea casi siempre es un copolímero injertado, o uno de bloque que contenga unidades estructurales de los dos polímeros.

Otras veces se mezcla simplemente para reducir el costo de material.

En otros casos, pequeñas cantidades de un polímero de alta calidad puede mejorar la del otro, al grado de permitir una nueva aplicación.

✓ Clasificación de polímeros por su origen

Polímeros naturales: son los que se pueden presentar en la naturaleza, por ejemplo: la celulosa, el caucho natural, las resinas, etc.

Polímeros Semisintéticos: son los obtenidos por transformación química de los polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular, por ejemplo: la seda artificial obtenida a partir de la celulosa.

Polímeros Sintéticos: son los que se obtienen por vía puramente sintética a partir de sustancias de bajo peso molecular, por ejemplo el nylon.

✓ Clasificación de polímeros por su estructura

Polímeros lineales: formados por largas cadenas de macromoléculas no ramificadas.

Polímeros Ramificados: están constituidos por macromoléculas en las que la cadena principal presenta una serie de ramificaciones laterales.

Polímeros Reticulados: están formados por macromoléculas con cadenas y ramificaciones entrelazadas en las tres dimensiones del espacio.

✓ Clasificación de polímeros por su formación.

Polimerizados: son polímeros cuyas macromoléculas se han formado por unión de moléculas monómeras no saturadas, por ejemplo: el polietileno.

Policondensados: son polímeros cuyo enlace entre macromoléculas son multifuncionales, con separación de algún producto de bajo peso molecular, por ejemplo: el Nylon, las proteínas.

Poliaductos: son aquellos cuyo enlace entre las macromoléculas son multifuncionales, sin separación de moléculas sencilla, por ejemplo: poliuretanos y resinas.

➤ **Polímeros empleados en la investigación**

✓ **Texilán 553¹³**

➤ **Introducción**

A continuación se presenta el contenido de la ficha técnica elaborada por el fabricante sobre el producto Texilán 553, el cual será utilizado durante el desarrollo de la investigación.

➤ **Generalidades**

El Texilán 553 es una emulsión acuosa de un copolímero acrílico estirenado, con excelente resistencia al agua.

➤ **Características**

El Texilán 553 confiere flexibilidad, da un acabado libre de tack. Tiene gran resistencia a la hidrólisis y al agua. Posee buena adherencia a varios sustratos, buen flujo y nivelación y es compatible con varios agentes coalescentes del tipo de Butil Cellosolve, Butil Carbitol, Acetato de Diglicol Butílico, etc.

Acepta cargas del tipo carbonato de calcio, caolín, etc.

Es compatible con plastificantes del tipo Dibutil Ftalato.

➤ **Campos de aplicación**

El Texilán 553 es un ligante de alta calidad para pinturas base agua, selladores, enlucidos, adhesivos para pisos y baldosines, impermeabilizantes para pisos, terrazas etc., morteros y capas

hidráulicas y reparaciones de mampostería en general.

➤ **Manejo y almacenamiento**

Debe almacenarse en recipientes de polietileno, vidrio o materiales inertes semejantes. Los recipientes deben permanecer cerrados para minimizar la formación de película.

El Texilán 553 es suministrado en tambores de 200 kilos.

¹³ Ficha técnica Texilán 553, Andercol S.A., Medellín, 1988

➤ **Especificaciones**

Características	Valor	Método Andercol IT
Viscosidad Stormer(KU), 25°C	80–100	1.07
Viscosidad Brookfield (cps),25°C (Aguja 4, 20 rpm)	3500-7500	1.06
% sólidos	49.5-51.5	1.12
Kg/galón, 25°C	3.80-3.90	1.08
pH	7.5-9	1.10
Grumos	Negativo	6.11

➤ **Propiedades**

✓ **Impermeabilidad**

Los morteros preparados con Texilán son impermeables al paso del agua.

✓ **Resistencia Mecánica**

Los morteros adicionados con Texilán presentan una alta resistencia a la abrasión y al impacto, así como a la compresión.

✓ **Adherencia**

Cuando se prepara un mortero con texilán, éste presenta una gran adherencia al substrato en que se aplica, que bien puede ser otro concreto antiguo.

✓ **Flexibilidad**

El Texilán 553 proporciona a los morteros una flexibilidad mayor que la de los concretos comunes.

✓ **Resistencia química**

La aplicación de Texilán 553 a un mortero de cemento mejora su resistencia a la intemperie y los ambientes agresivos y en general, su resistencia a los ataques químicos.

➤ **Campos de aplicación**

Impermeabilización de tanques y terrazas: Por impermeabilizar el mortero, el Texilán 553 resulta ideal en el cubrimiento interior de tanques de almacenamiento de aguas y en la impermeabilización de terrazas y todo tipo de losas de concreto como en baños y cocinas.

También se utiliza en la impermeabilización horizontal y vertical de cimientos como mortero de pega y revoque para los bloques de sobrecimiento.

Endurecedor de pisos en bodegas y parqueaderos: Por la alta resistencia al impacto y la abrasión que presentan los morteros preparados con Texilán, se utilizan en el cubrimiento de pisos que presentan tráfico pesado como los de parqueaderos, patios de cargue y descargue de camiones y bodegas con alta carga de almacenamiento.

Cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas Debido a la gran resistencia a la abrasión que imparte el Texilán a los morteros, se utiliza en el cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas de todo tipo.

Elaboración de revoques y pañetes Por su gran adherencia y flexibilidad, los morteros y preparados con Texilán tienen excelente comportamiento cuando se aplican como revoques de muro, ya que no sólo se evita su desprendimiento, sino que presenta gran resistencia y elasticidad a los movimientos diferenciales causados por la contracción (retracción) de las estructuras de mampostería y los sismos.

Cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas para el tratamiento de aguas. La impermeabilidad y resistencia química de los morteros adicionados con Texilán permiten el cubrimiento de estructuras para el tratamiento de agua, haciéndolas impermeables y evitando el deterioro que los agentes químicos utilizados, ocasionan en el concreto.

Estabilización de suelos: De acuerdo Andercol S.A., el fabricante y proveedor del producto, el uso de este polímero en la estabilización de suelos finos con ligantes hidráulicos puede permitir un incremento en la resistencia y mejorar las propiedades de elasticidad y permeabilidad del material.

➤ **Modo de empleo**

Para lechadas: se mezcla el Texilán con el cemento y se agrega agua hasta obtener la consistencia deseada.

Para morteros y concretos: se prepara la mezcla de agregados (ya sea arena para el mortero o arena y grava para el concreto) y cemento con la dosis recomendada de Texilán, y se adiciona agua hasta obtenerse la consistencia deseada.

➤ **Dosis recomendada (En porcentaje por peso del cemento)**

Impermeabilización y resistencia mecánica: cuando se usa en trabajos de impermeabilización o de recubrimientos sometidos a exigencias mecánicas altas, se utiliza Texilán en una proporción de 10% a 15% del peso del cemento.

Adherencia y flexibilidad para reparaciones: utilizado para proveer adherencia y flexibilidad en trabajos de reparación o de revoque donde no sean críticas la impermeabilidad y las exigencias mecánicas. Se dosifica el Texilán de 5% a 10% del peso del cemento.

✓ **Construcril 1662¹⁴.**

➤ **Introducción**

A continuación se presenta el contenido de la ficha técnica elaborada por el fabricante sobre el producto Construcril 1662, el cual será utilizado durante el desarrollo de la investigación.

➤ **Generalidades**

El Construcril 1662 es una emulsión de un polímero acrílico de peso molecular elevado diseñado especialmente para mejorar las propiedades de los materiales que contienen cemento portland.

➤ **Características**

La modificación de morteros cementosos por medio de polímeros es ampliamente practicada en paneles arquitectónicos de construcción, revestimientos tipo estuco sobre una gran variedad de sustratos y productos para nivelación y parcheo de pisos.

✓ **Durabilidad y resistencia**

Los morteros de cemento modificados con Construcril 1662 son duros, firmes y durables, presentan superior resistencia a la flexión, resistencia adhesiva y al impacto que aquellos morteros que no se modifican con el Construcril 1662. Debido a las anteriores características, los morteros modificados se recomiendan para ser usados en áreas con excesiva vibración y tráfico pesado.

¹⁴ Ficha técnica Construcril 1662, Andercol S.A., Medellín, 1988

✓ Adhesión y resistencia

Los morteros de cemento modificados con Construcril 1662 tienen excelente adhesión a una gran variedad de sustratos, tales como cemento, ladrillo, metales, espumas aislantes y madera, entre otros, además son estables a la luz ultravioleta y resisten la decoloración debida a la luz solar y a la humedad.

➤ Manejo y almacenamiento

Para el manejo del Construcril 1662 deben observarse las medidas de seguridad usuales para la manipulación de productos químicos, tales como una buena ventilación del área de trabajo, uso de gafas de seguridad delantal protector y guantes de caucho.

Debe almacenarse en recipientes de polietileno, acero inoxidable, vidrio o materiales inertes semejantes, en ningún caso deberá entrar en contacto directo con hierro no protegido contra la oxidación.

El construcril 1662 es suministrado en tambores de 200 kilos.

➤ Utilización en la estabilización de suelos

De acuerdo con Andercol S.A., el fabricante y proveedor del producto, el uso de este polímero en la estabilización de suelos finos con ligantes hidráulicos puede permitir un incremento en la resistencia y mejorar las propiedades de elasticidad y permeabilidad del material.

➤ Especificaciones

Características	Valor	Método Andercol IT
Viscosidad Brookfield (cps), 25°C (LVT, Aguja 1, 60 rpm)	100 Máx	1.06
% sólidos	46.0–48.0	1.12
kg/galón, 25°C	3.90–4.04	1.08
pH	9.0–10.0	1.10
Mínima temperatura de formación de película (MFFT, °C)	13° C	

3. ANALISIS DEL EFECTO DE LOS ESTABILIZANTES EN EL SUELO NATURAL

3.1. ANALISIS DEL EFECTO DE LA CAL EN EL COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS SUELOS

3.1.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto de la cal en el comportamiento físico–mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Se elaboraron ochenta (80) briquetas Harvard miniatura con mezclas de los suelos con la humedad óptima de compactación y porcentajes de cal del 2%, 4%, 6% y 8% y sin cal.
- ✓ Se midió la resistencia a la compresión inconfiada de una (1) biqueta por cada contenido de cal, con un periodo de maduración de 1 hora, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la biqueta.
- ✓ Se envolvió cada una de las sesenta (60) briquetas restantes con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no perdieran humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de las briquetas.

3.1.2. Resultados

✓ Suelo 1

En la tabla 13 se presentan los resultados del análisis del efecto de la cal en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 13. Efecto de la adición de la cal. Suelo 1

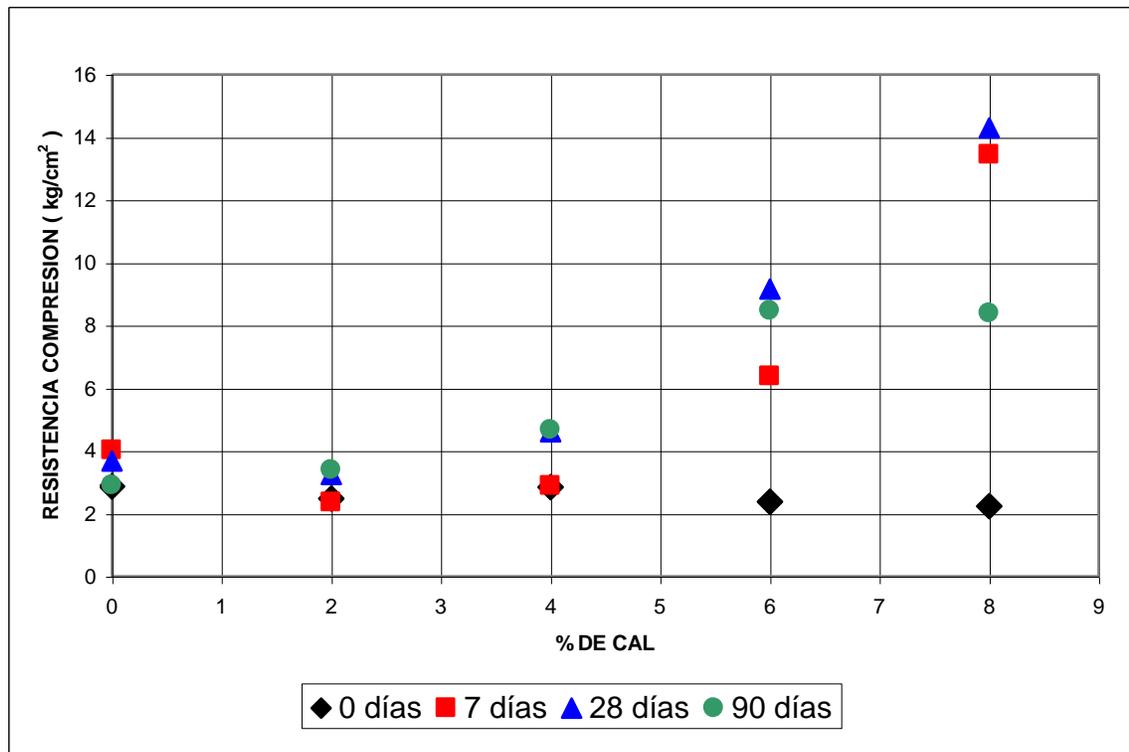
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	2,87	4,02	3,67	2,91	4,27	4,27	3,56	3,92	49,12	38,39	48,80	49,69	5,4
2% de Cal	2,48	2,35	3,24	3,40	4,27	2,85	2,85	1,78	49,12	38,25	50,71	50,87	12,25
4% de Cal	2,84	2,88	4,61	4,67	3,56	1,42	2,49	1,78	49,12	38,28	54,04	51,16	12,86
6% de Cal	2,38	6,38	9,16	8,47	2,85	2,85	3,85	2,14	52,24	39,97	50,30	51,09	13,15
8% de Cal	2,23	13,45	14,29	8,39	2,85	3,21	2,14	1,78	51,09	37,46	49,12	50,93	13,16

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 24 se muestra el efecto de la cal en la resistencia del suelo 1 para diferentes periodos de curado.

Ilustración 24 Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada Suelo 1



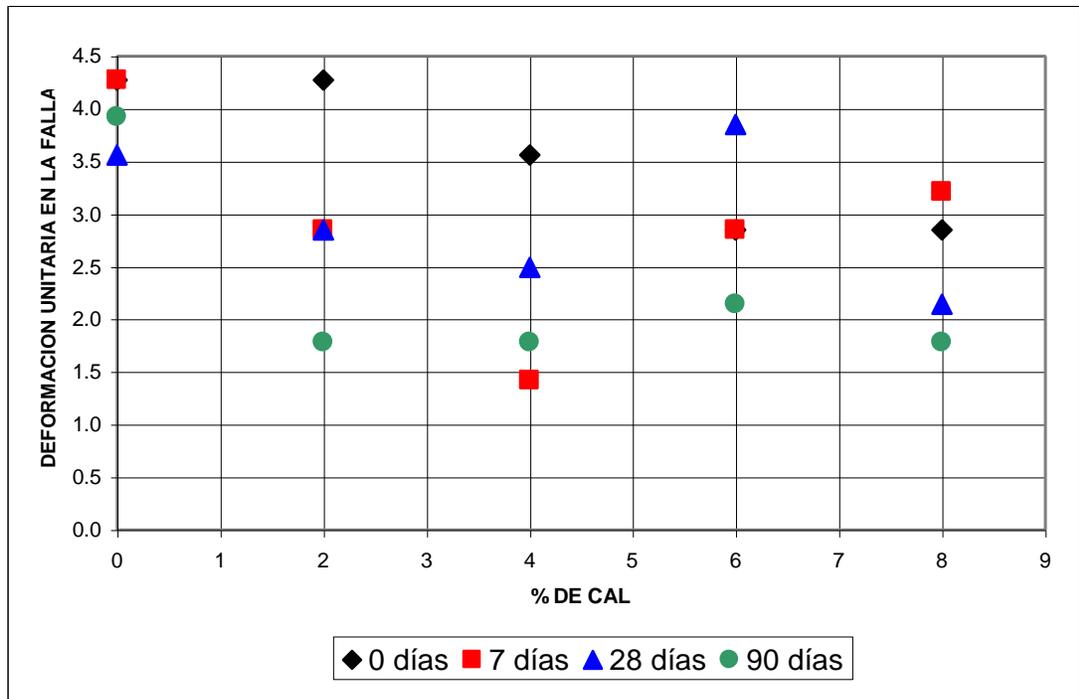
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% o menor no se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% se observa una mejora significativa en el comportamiento del suelo, la cual es mayor en la medida que se incrementa la cantidad de cal adicionada.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se observan incrementos en la resistencia, pero esto pierde relevancia cuando los porcentajes de cal adicionada son del 8%.
- ✓ Después de los 28 días de curado no se observan incrementos importantes en la resistencia especialmente para porcentajes de cal menores al 6%.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cal.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla**

En la Ilustración 25 se muestra el efecto de la cal en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 25. Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla. Suelo 1



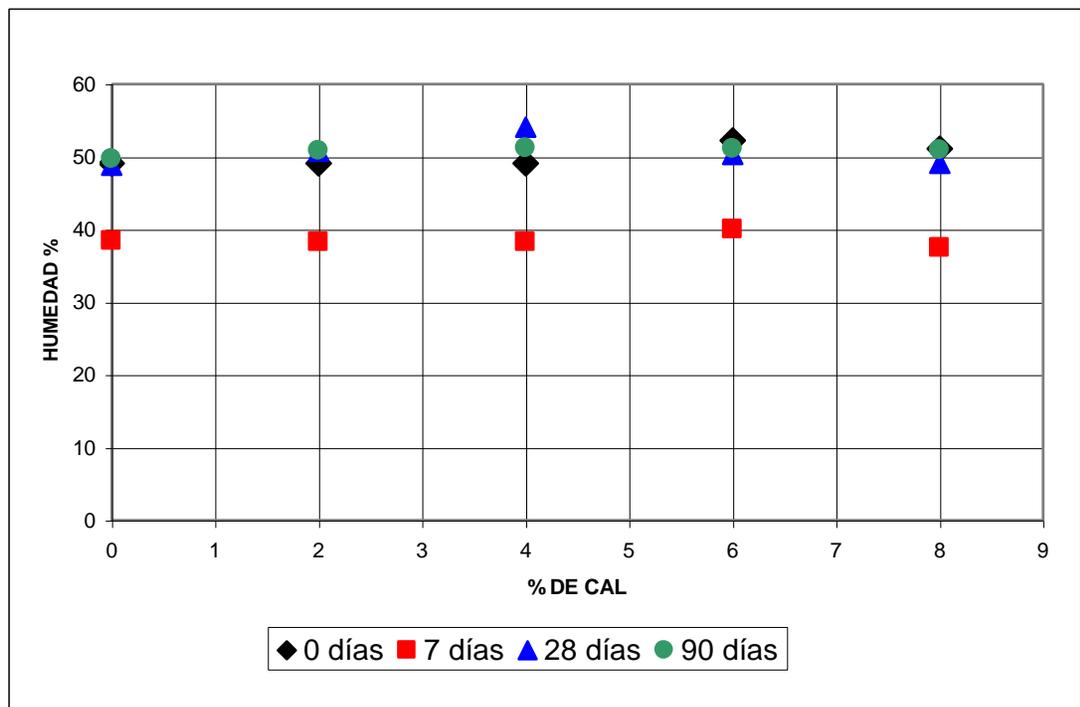
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa el porcentaje de cal se disminuye la deformación unitaria en la falla de la muestra. Se vuelve más rígida.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de curado la deformación unitaria en la falla es menor para los mismos porcentajes de cal. Con el tiempo también se vuelve más rígida.
- ✓ La mayor disminución en la deformación unitaria en la falla se presenta para porcentajes entre el 2 y el 4%.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad**

En la ilustración 26 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 26. Efecto de porcentaje de cal en la variación de la humedad suelo 1



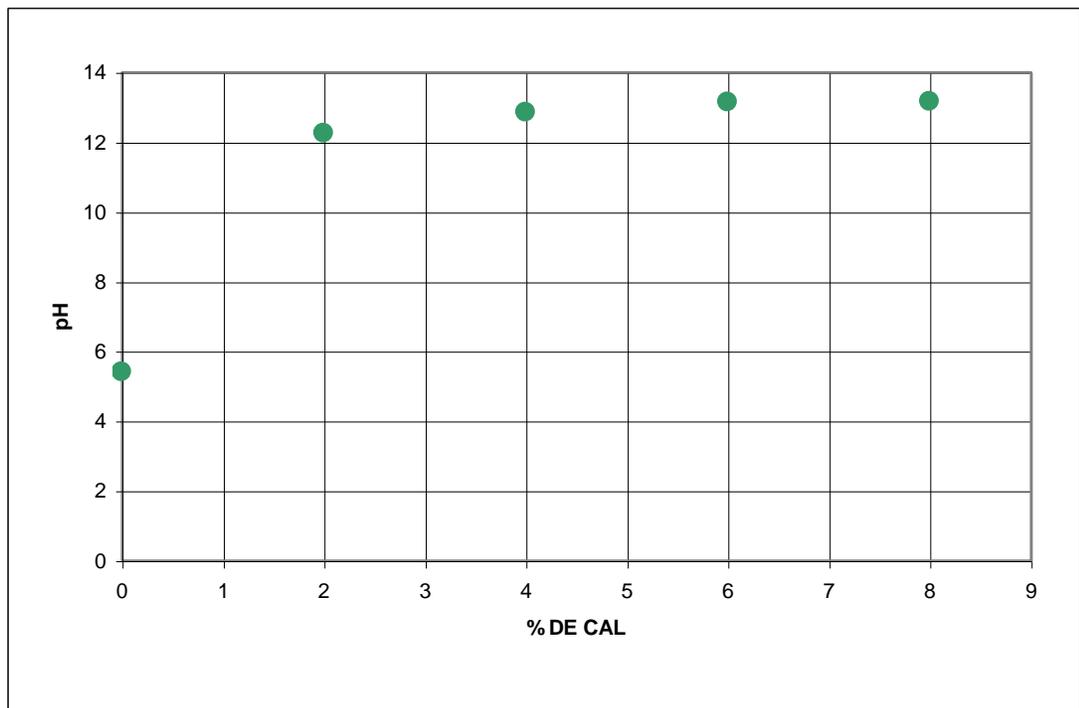
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cal en la variación de la humedad.
- ✓ Se observa que la muestras inicialmente pierden humedad pero la cual recuperan con el tiempo.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo**

En la ilustración 27 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 27. Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo 1



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cal, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.

✓ **Suelo 2**

En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis del efecto de la cal en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 14. Efecto de la adición de cal. Suelo 2

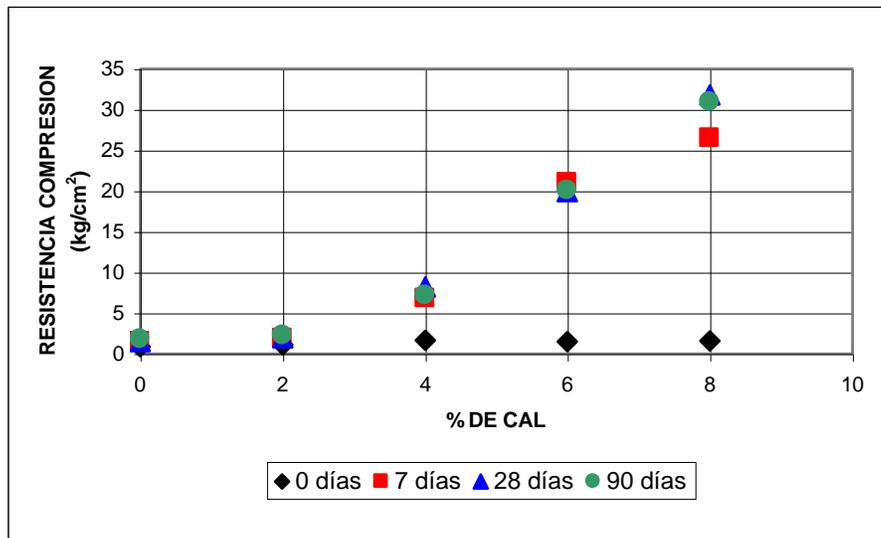
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	0,86	1,52	1,50	1,79	12,11	9,97	10,69	8,55	35,16	32,85	33,09	30,30	5,56
2% de Cal	1,08	1,86	1,96	2,24	7,84	4,99	7,12	5,70	49,12	35,67	36,70	34,69	12,71
4% de Cal	1,61	6,82	8,19	7,20	7,84	3,21	4,63	2,14	36,95	35,19	35,72	35,20	12,95
6% de Cal	1,51	21,01	19,96	20,10	6,41	2,85	2,85	2,85	36,61	34,76	35,19	33,54	13,02
8% de Cal	1,57	26,48	31,81	30,90	4,99	2,85	3,56	2,49	36,51	33,65	34,58	32,91	13,03

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 28 se muestra el efecto de la cal en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 28. Efecto del porcentaje cal en la resistencia a la compresión inconfiada Suelo 2



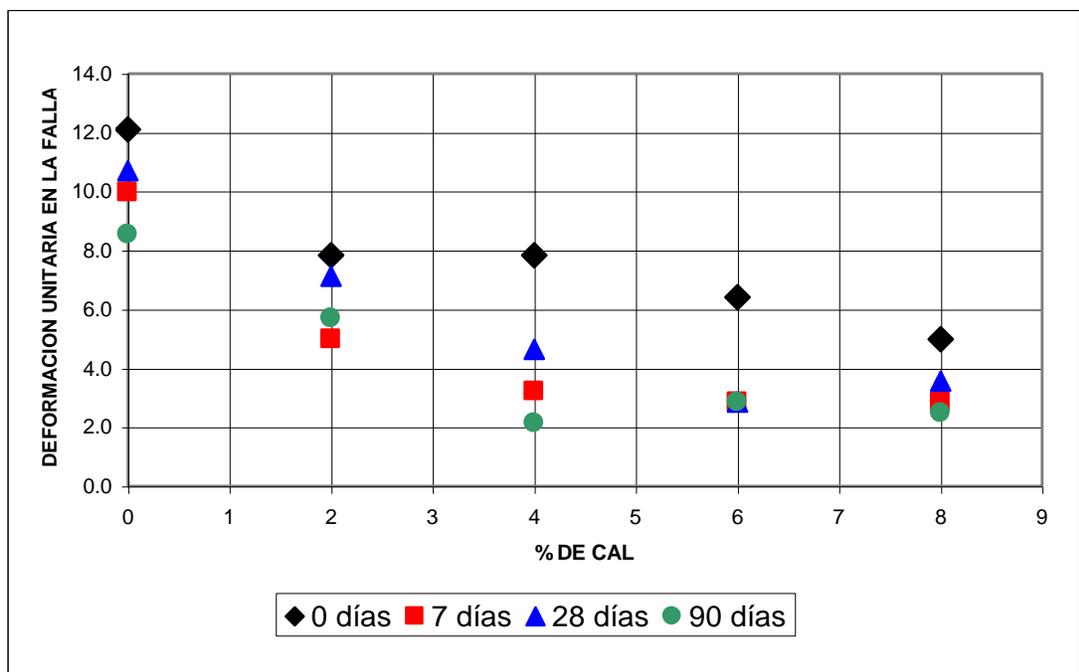
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% o menor no se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% se observa una mejora significativa en el comportamiento del suelo, la cual es mayor en la medida que se incrementa la cantidad de cal adicionada.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se observan incrementos en la resistencia.
- ✓ Después de los siete días de maduración de las muestras no se observan incrementos considerables en la resistencia del suelo.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cal.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 29 se muestra el efecto de la cal en la deformación unitaria en la falla en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 29. Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla Suelo 2



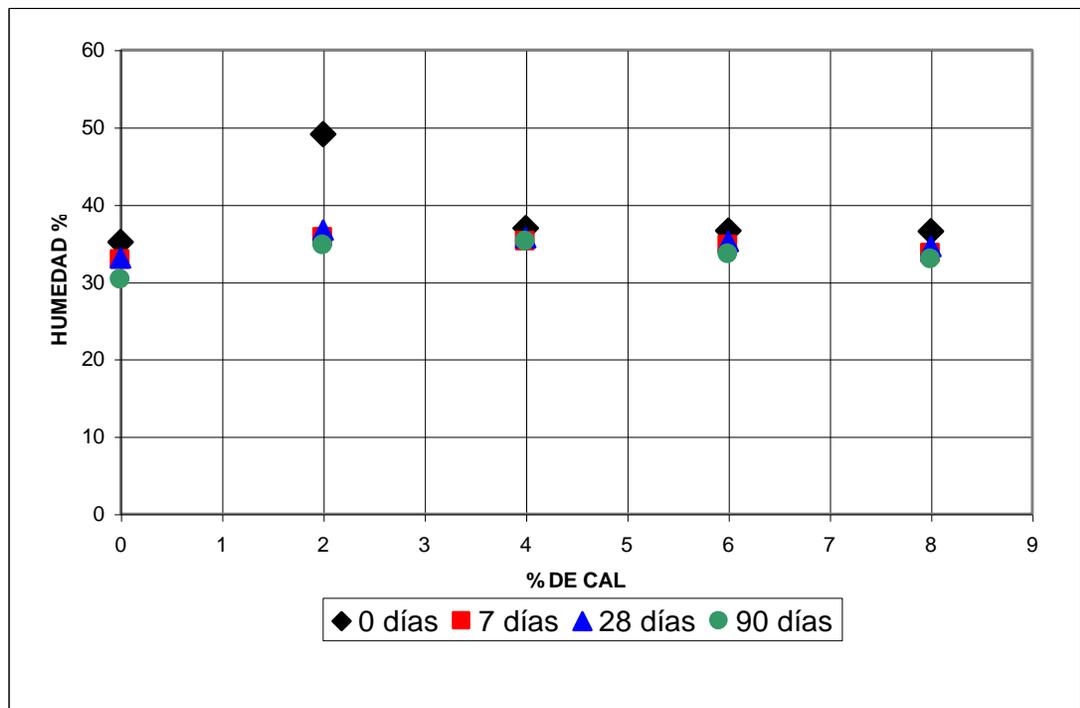
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa el porcentaje de cal se disminuye la deformación unitaria en la falla de la muestra.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de curado la deformación unitaria en la falla es menor para los mismos porcentajes de cal, es decir que con el tiempo aumenta la rigidez.
- ✓ La mayor disminución en la deformación unitaria se presenta para porcentajes entre el 4 y el 6%.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad**

En la ilustración 30 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 30. Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad. Suelo 2



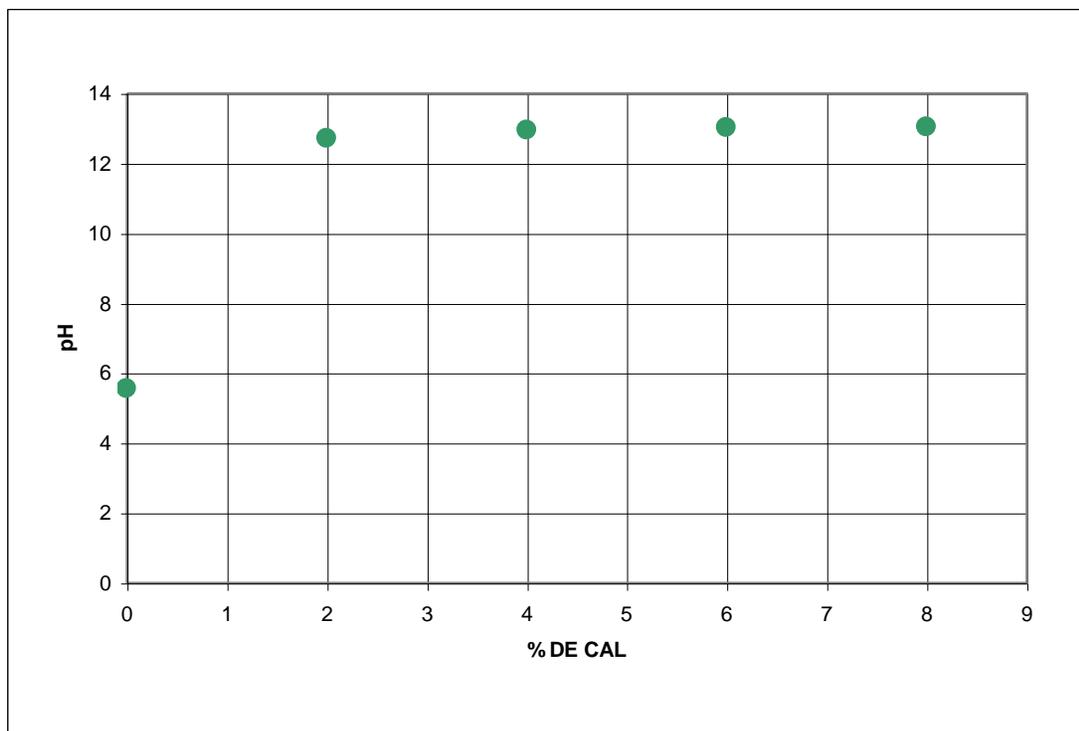
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cal en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo**

En la ilustración 31 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 31. Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo 2



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cal, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.

✓ **Suelo 3**

En la tabla 15 se presentan los resultados del análisis del efecto de la cal en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 15. Efecto de la adición de cal. Suelo 3

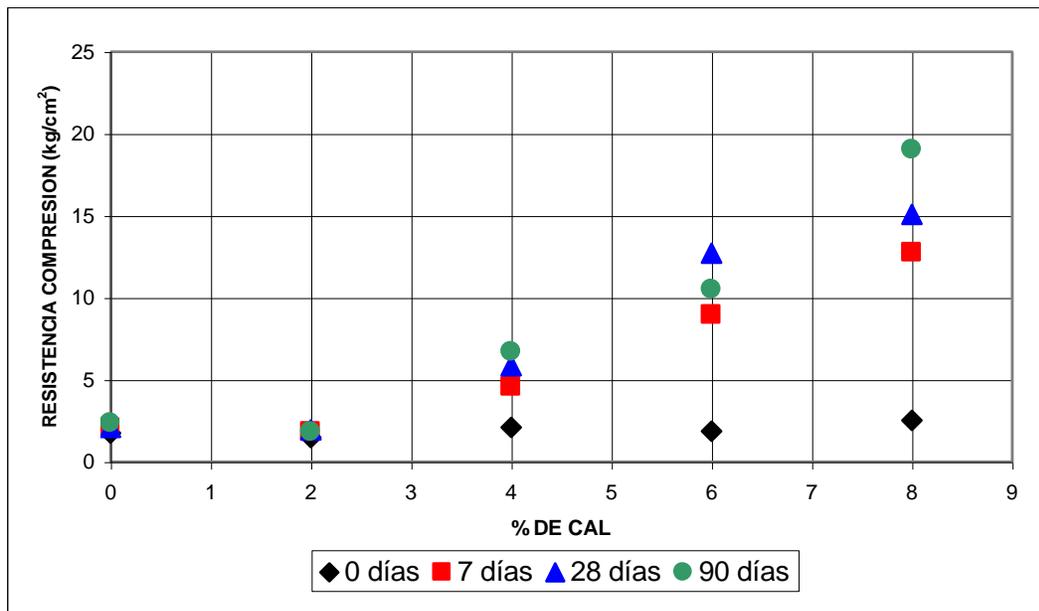
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	1,74	2,07	2,08	2,35	2,85	2,85	2,14	1,42	31,56	30,49	37,24	32,54	5,54
2% de Cal	1,49	1,82	1,95	1,81	2,85	2,85	2,14	1,78	30,53	30,49	23,57	23,07	12,44
4% de Cal	2,10	4,56	5,86	6,69	2,85	2,14	1,42	1,78	30,17	30,69	30,99	30,66	12,91
6% de Cal	1,85	8,94	12,70	10,52	2,85	3,56	2,14	1,78	29,85	31,70	32,21	32,85	12,95
8% de Cal	2,51	12,75	15,08	19,05	2,14	4,27	2,49	2,14	31,52	28,20	28,98	31,70	13,06

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 32 se muestra el efecto de la cal en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 32. Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 3



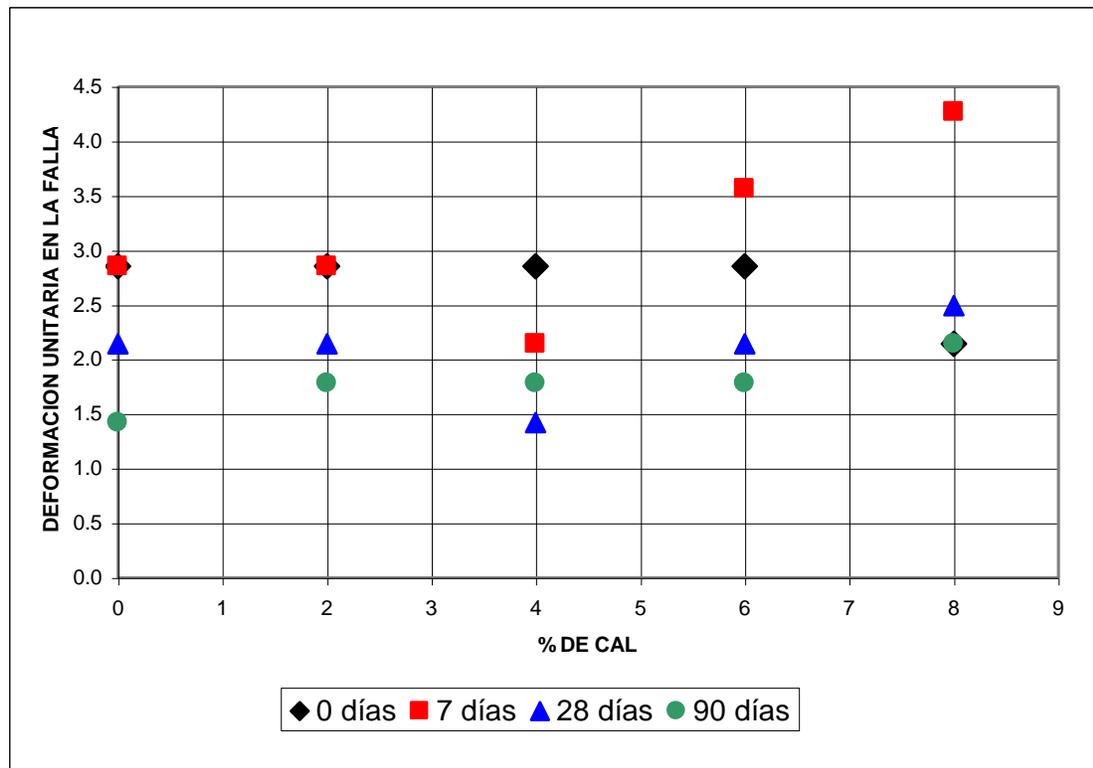
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% o menor no se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% se observa una mejora significativa en el comportamiento del suelo, la cual es mayor en la medida que se incrementa la cantidad de cal adicionada.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se observan incrementos en la resistencia.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cal.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 33 se muestra el efecto de la cal en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 33. Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla Suelo 3



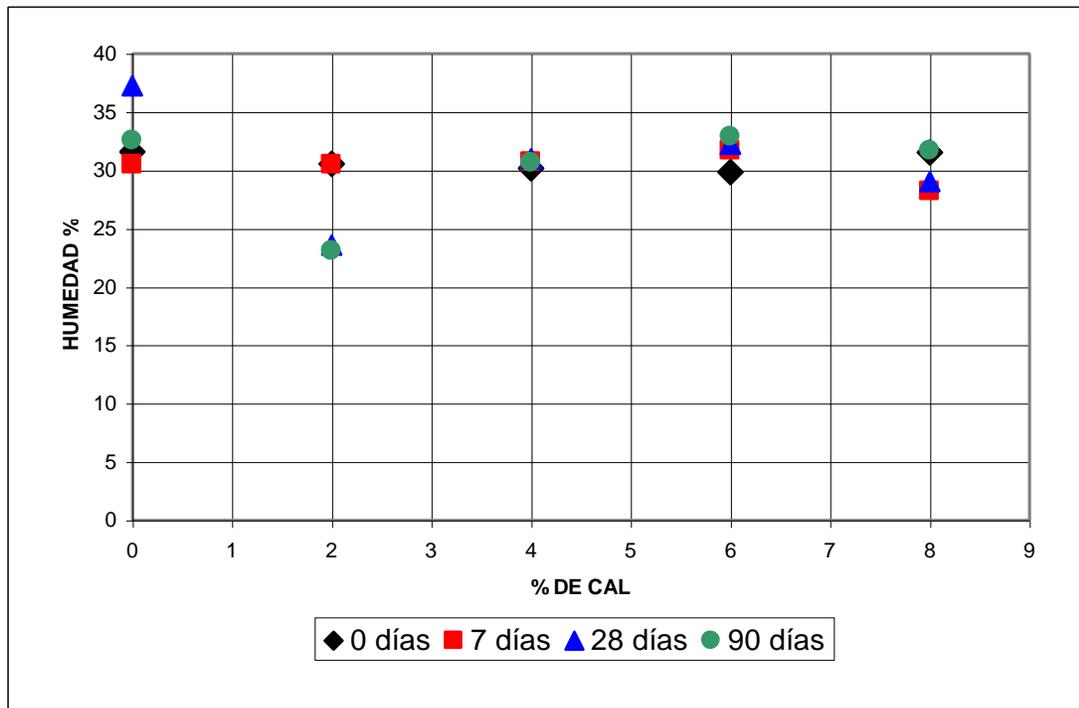
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observa disminución de la deformación unitaria en la falla con el incremento del porcentajes de cal adicionada.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 4% se observa que a los 7 días de maduración se presenta un incremento en la deformación unitaria en la falla pero posteriormente disminuye a valores inferiores a los iniciales.
- ✓ La mayor disminución en la deformación unitaria se presenta para porcentajes del 4%.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad**

En la ilustración 34 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 34. Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad. Suelo 3



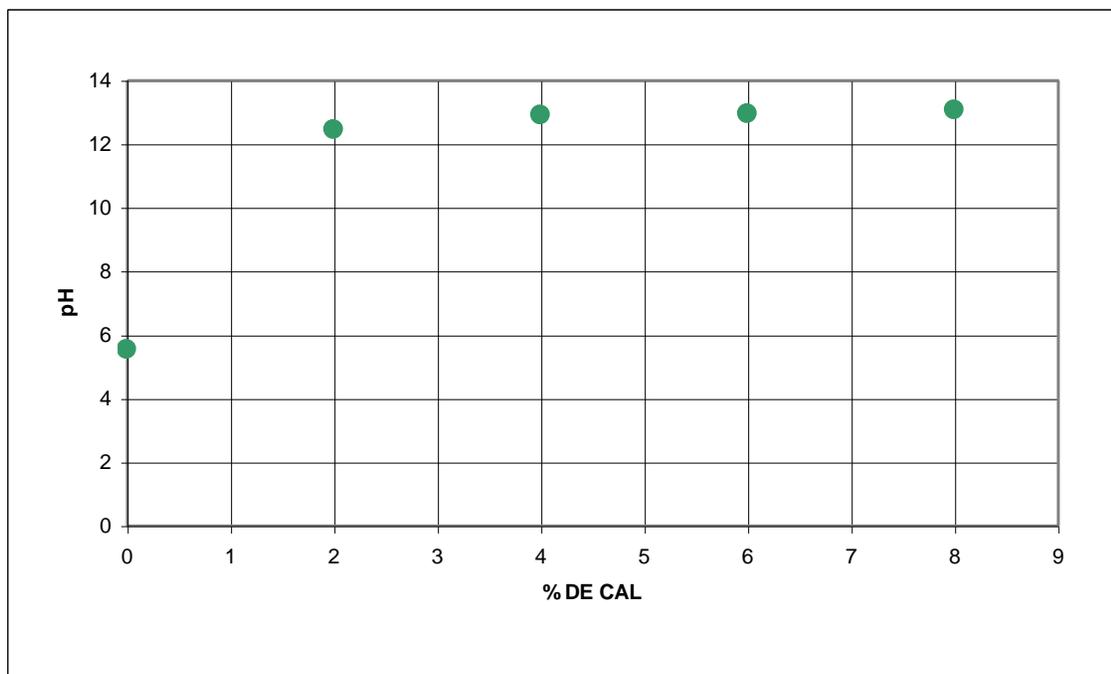
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cal en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo**

En la ilustración 35 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 35. Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo 3



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cal, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.

✓ **Suelo 4**

En la tabla 16 se presentan los resultados del análisis del efecto de la cal en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 16. Efecto de la adición de cal. Suelo 4

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	1,07	1,26	1,78	1,75	7,84	6,41	6,41	4,99	42,87	41,05	MHD	40,33	4,95
2% de Cal	0,90	1,46	1,49	1,34	9,26	7,84	8,55	4,99	44,05	42,02	MHD	41,32	12,13
4% de Cal	1,21	3,12	3,22	1,91	3,56	3,56	2,85	1,78	43,59	41,74	MHD	40,48	12,79
6% de Cal	2,30	7,87	10,69	11,00	3,56	3,56	2,14	2,14	42,56	41,94	41,02	39,26	12,81
8% de Cal	1,97	14,25	21,01	21,17	3,56	4,27	2,85	2,14	44,07	41,54	41,65	43,63	13,06

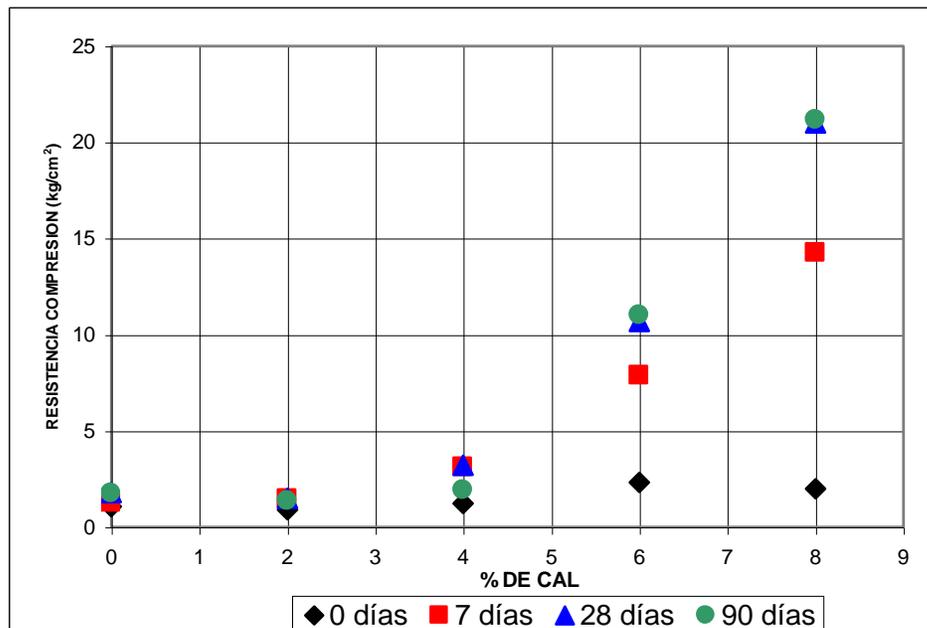
MHD: La muestra para humedad se dañó.

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 36 se muestra el efecto de la cal en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 36. Efecto del porcentaje de cal en la resistencia a la compresión inconfiada–Suelo 4



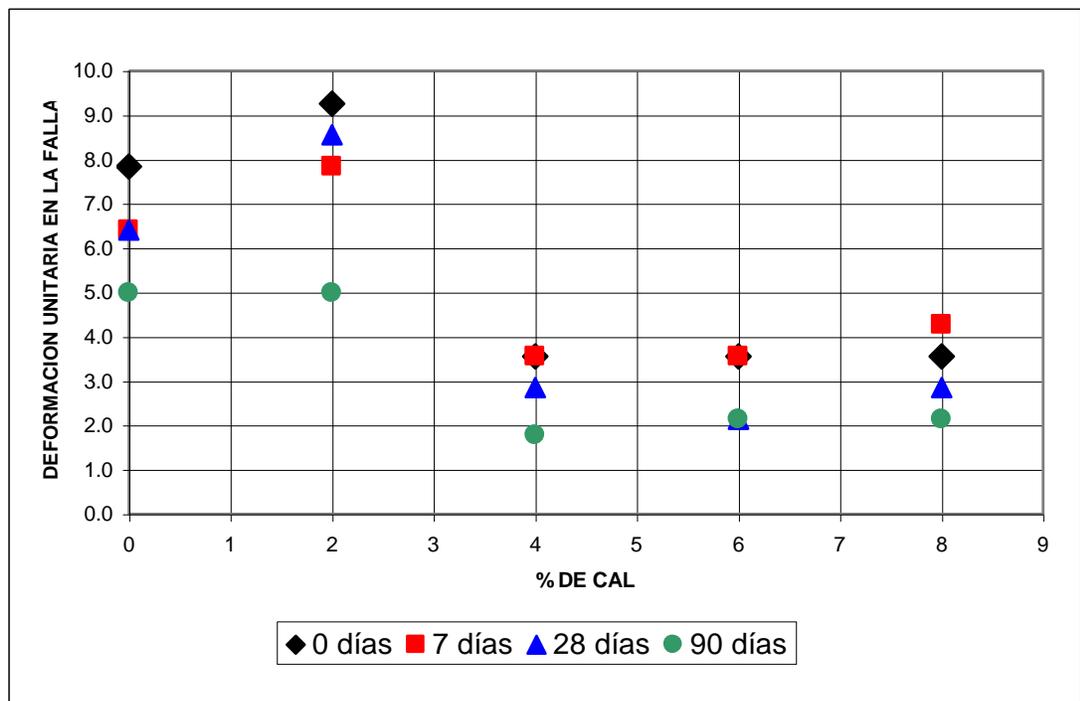
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 4% o menor no se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 4% se observa una mejora significativa en el comportamiento del suelo, la cual es mayor en la medida que se incrementa la cantidad de cal adicionada.
- ✓ Después de los 28 días de maduración de las muestras no se observan incrementos significativos en la resistencia.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cal.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 37 se muestra el efecto de la cal en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 37. Efecto del porcentaje de cal en la deformación unitaria en la falla. Suelo 4



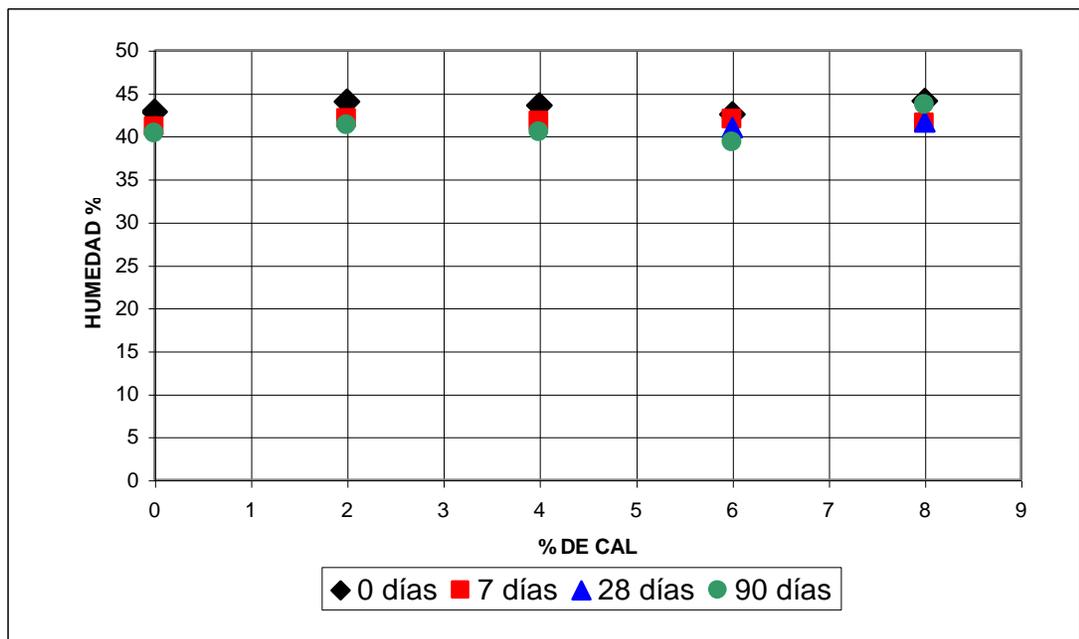
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% se observa una disminución en la deformación unitaria en la falla a valores inferiores a los que presenta sin adición de cal.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se disminuye levemente la deformación unitaria en la falla.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en la variación de la humedad**

En la ilustración 38 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 38. Efecto de % de cal en la variación de la humedad. Suelo 4



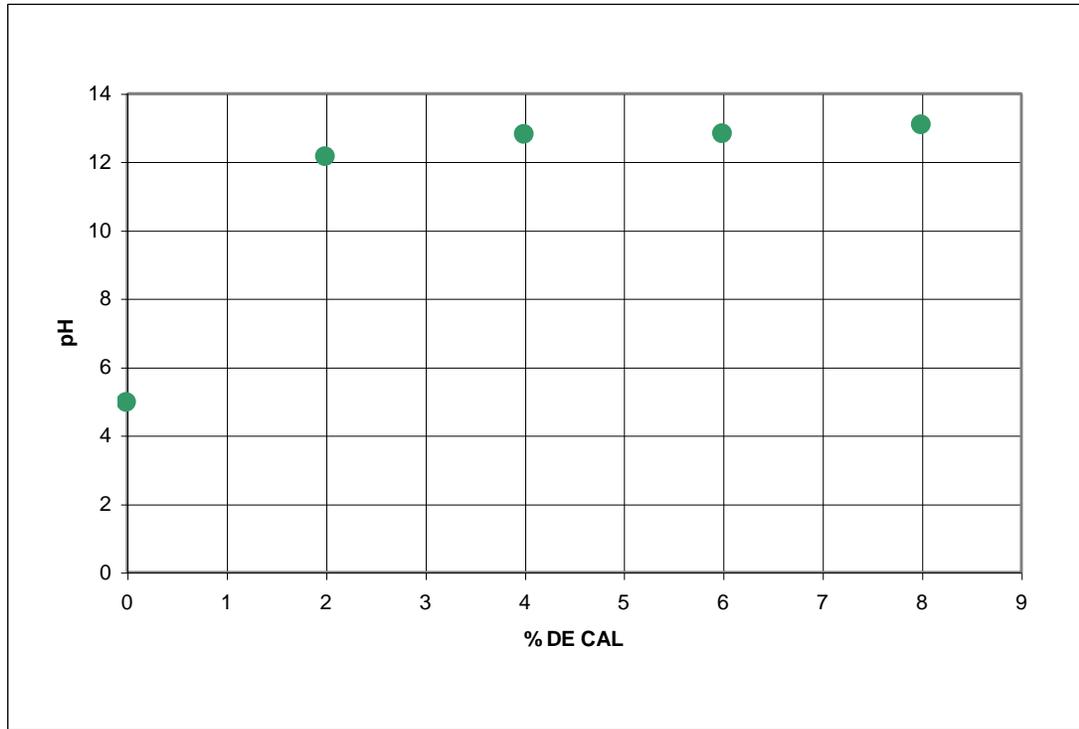
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cal en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo**

En la ilustración 39 se muestra el efecto de la cal en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 39. Efecto del porcentaje de cal en el pH del suelo 4



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
- ✓ Para porcentajes de cal superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cal, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.

3.2. ANALISIS DEL EFECTO DEL CEMENTO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

3.2.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del cemento en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Se elaboraron ochenta (80) briquetas harvard miniatura con mezclas de los suelos con la humedad óptima y porcentajes de cemento del 2%, 4%, 6% y 8%.

- ✓ Se midió la resistencia a la compresión inconfiada de una (1) briqueta por cada contenido de cemento con un periodo de maduración de 1 hora, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briqueta.
- ✓ Se envolvió cada una de las sesenta (60) briquetas restantes con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de las briquetas.

3.2.2. Resultados

✓ Suelo 1

En la tabla 17 se presentan los resultados del análisis del efecto del cemento en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 17. Efecto de la adición del cemento. Suelo 1

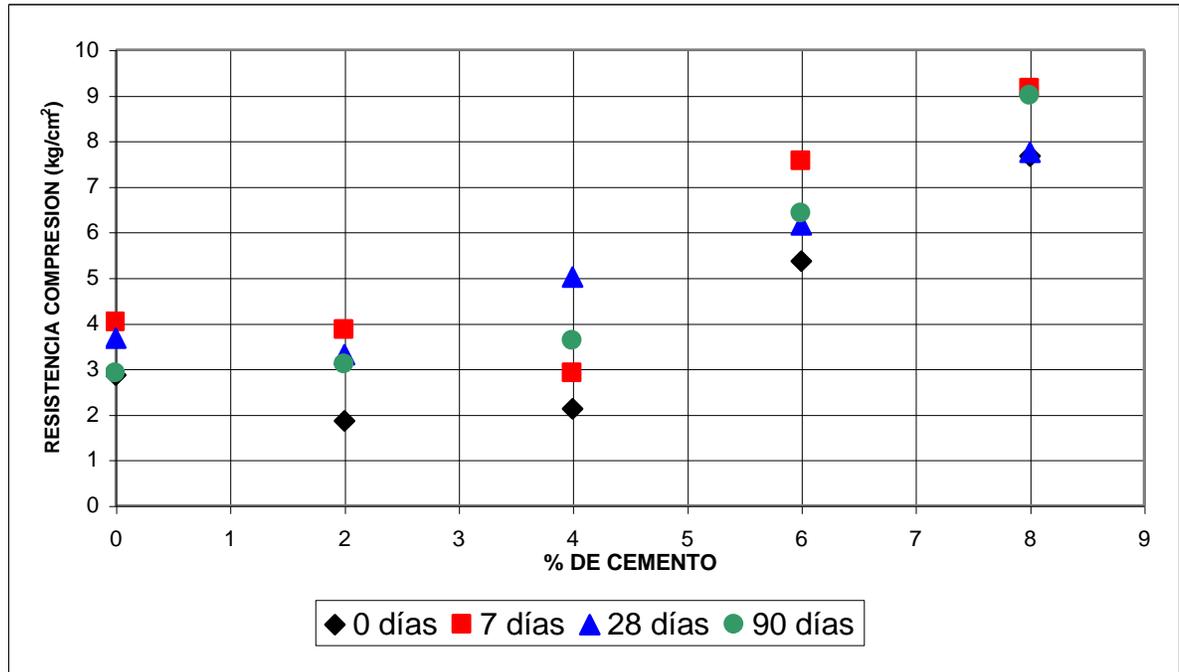
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	2,87	4,02	3,67	2,91	4,27	4,27	3,56	3,92	49,1	38,4	48,8	49,7	5,4
2% de cemento	1,86	3,86	3,31	3,11	4,99	4,27	3,56	4,27	50,2	49,0	50,6	49,8	10,3
4% de cemento	2,12	2,90	5,02	3,61	4,27	2,14	3,21	1,78	49,5	51,1	48,5	48,6	11,6
6% de cemento	5,37	7,55	6,16	6,41	2,85	3,92	1,78	3,21	48,0	47,6	47,0	51,2	11,7
8% de cemento	7,67	9,15	7,75	9,00	4,27	3,92	1,78	4,27	47,5	44,2	46,5	47,2	12,0

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del cemento en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 40 se muestra el efecto del cemento en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 40. Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada – Suelo 1



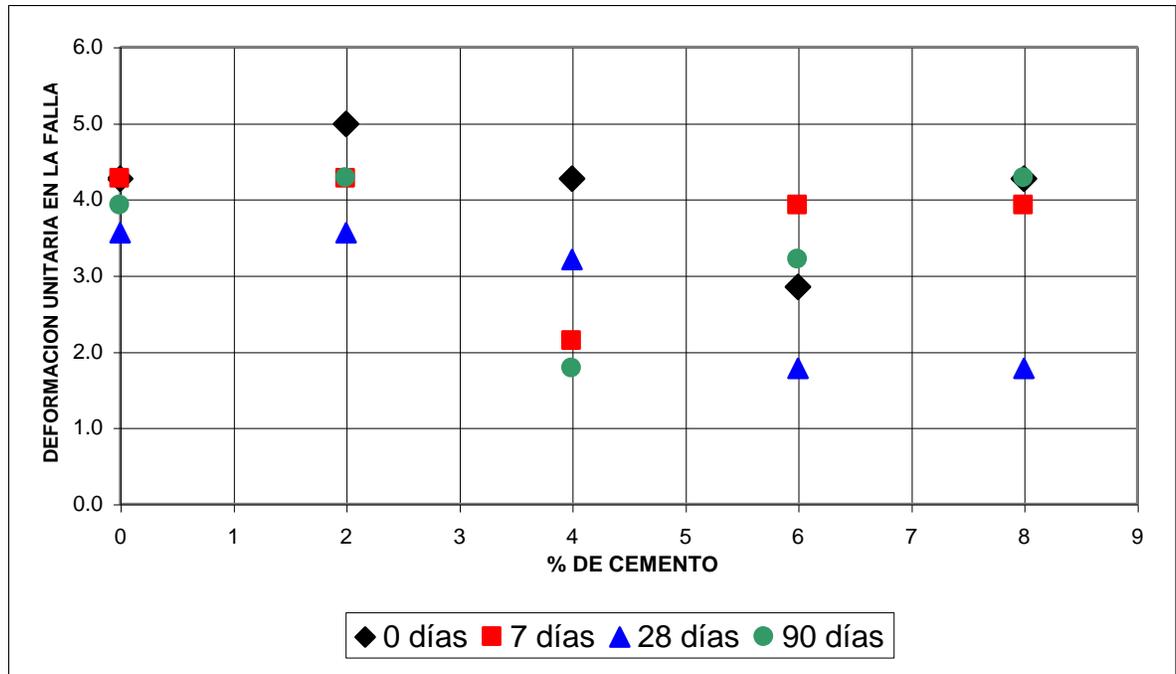
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de cemento menores al 4% no se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada.
- ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 4% se observa una mejora significativa en el comportamiento del suelo, la cual es mayor en la medida que se incrementa la cantidad de cemento adicionada.
- ✓ No se observa influencia significativa en el periodo de maduración.
- ✓ Las muestras falladas con cero días de maduración presentaran resistencias más bajas que las que tuvieron periodos más largos de curado.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cemento.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 41 se muestra el efecto del cemento en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 41. Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla. Suelo 1



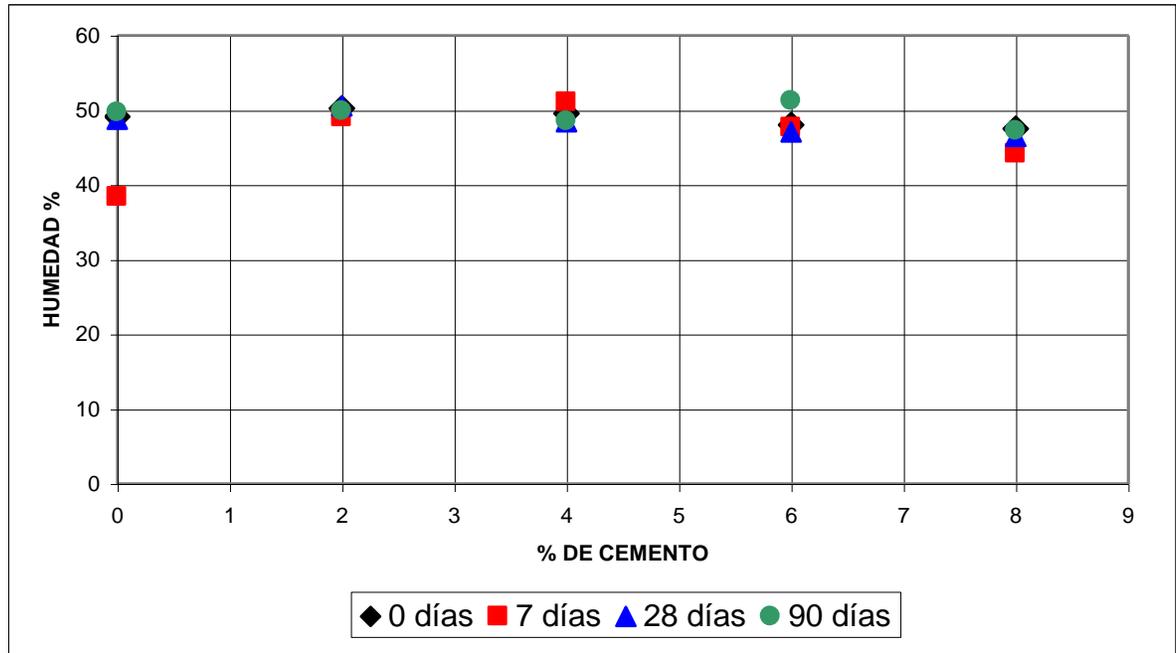
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observa una tendencia clara del efecto del cemento sobre la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Aparentemente la adición de cemento provoca una cierta disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad**

En la ilustración 42 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes períodos de curado.

Ilustración 42. Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad. Suelo 1



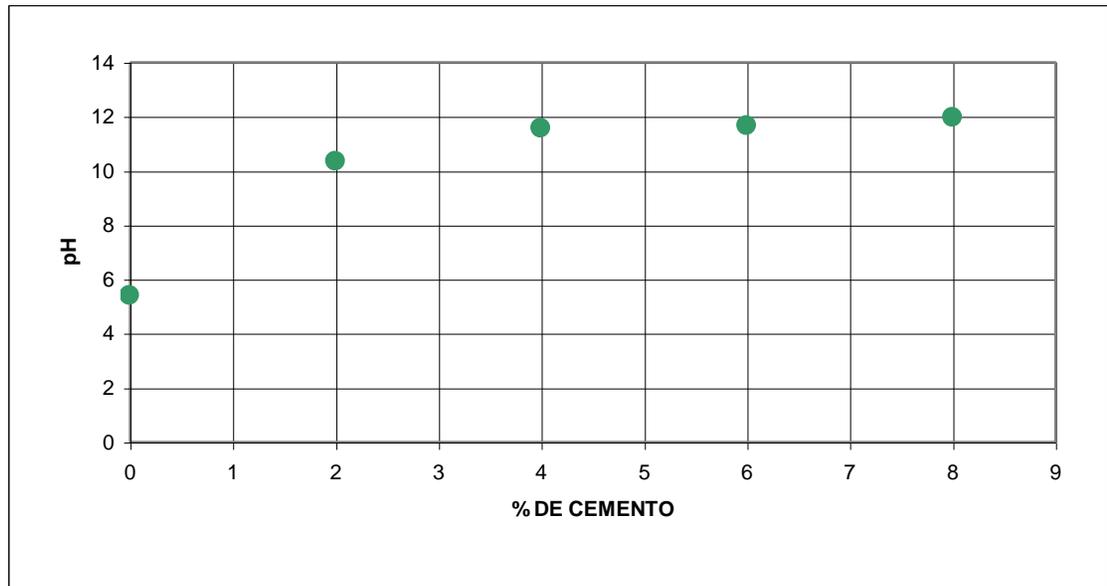
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cemento en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo**

En la ilustración 43 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 43. Efecto del porcentaje del cemento en el pH del suelo 1



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cemento del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
 - ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cemento, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.
- ✓ **Suelo 2**

En la tabla 18 se presentan los resultados del análisis del efecto del cemento en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 18. Efecto de la adición del cemento. Suelo 2

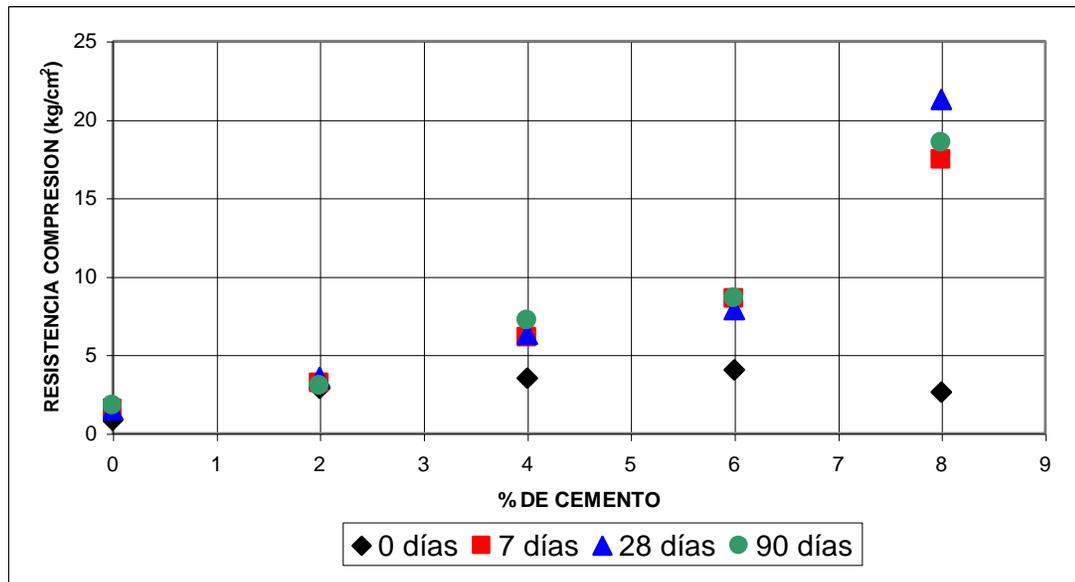
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	0,86	1,52	1,50	1,79	12,1	10,0	10,7	8,6	35,2	32,9	33,1	30,3	5,6
2% de cemento	2,86	3,18	3,55	3,05	5,70	4,27	3,56	2,85	31,5	31,0	31,9	30,6	11,6
4% de cemento	3,53	6,11	6,30	7,20	5,70	3,21	2,85	2,14	31,3	35,8	31,7	30,0	11,7
6% de cemento	4,04	8,56	7,89	8,60	4,27	3,21	1,42	1,78	28,6	27,1	28,0	26,2	11,9
8% de cemento	2,63	17,44	21,27	18,52	4,99	2,85	2,14	2,14	31,1	33,1	30,8	28,0	12,0

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 44 se muestra el efecto del cemento en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 44. Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 2



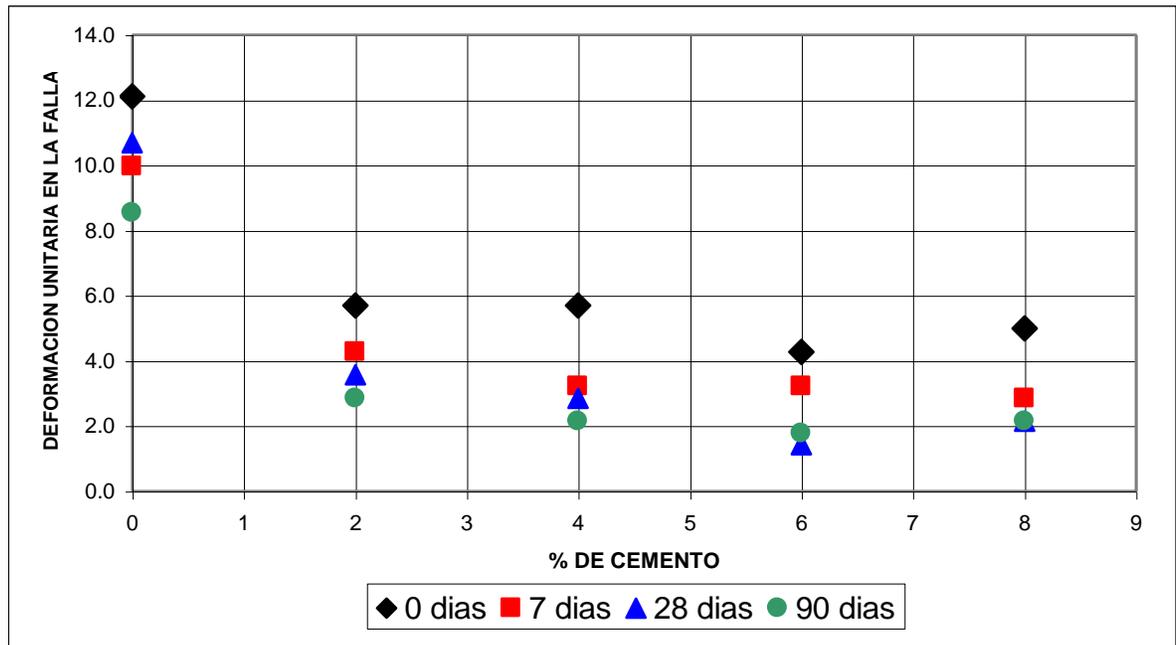
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de cemento menores del 8% el efecto del cemento en la resistencia del suelo no es significativo.
- ✓ Para porcentajes de cemento del 8% se obtienen incrementos en la resistencia del cemento significativas.
- ✓ Después de los siete días de maduración no se observan incrementos significativos en la resistencia del suelo.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cemento.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 45 se muestra el efecto del cemento en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 45. Efecto del % cemento en la deformación unitaria en la falla Suelo 2



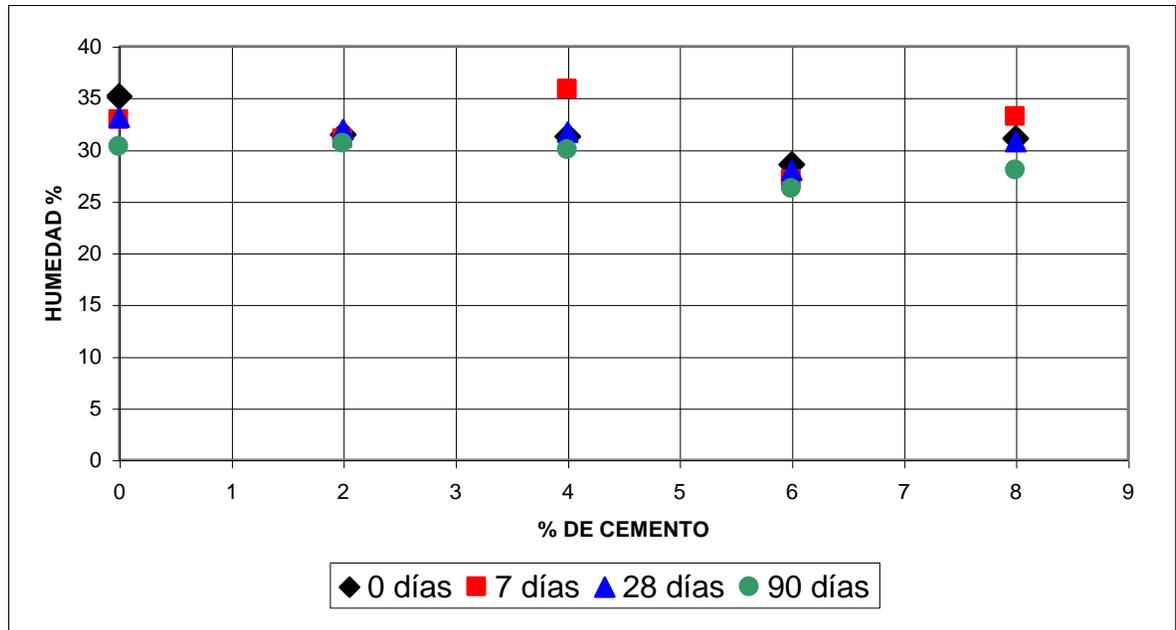
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de cemento provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la deformación unitaria en la falla.
- ✓ En la medida que incrementa el porcentaje de cemento se aumenta la disminución en la deformación unitaria en la falla.
- ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 6% aparentemente no se obtienen más disminución en la deformación unitaria en la falla.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad**

En la ilustración 46 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 46. Efecto de porcentaje de cemento en la variación de la humedad. Suelo 2



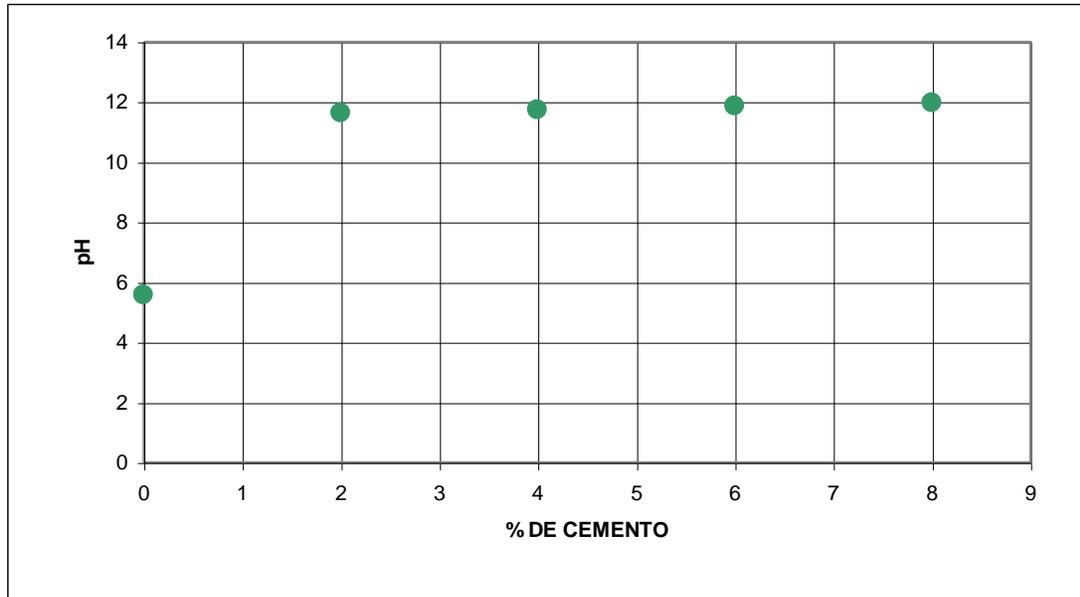
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cemento en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de Cemento en el pH del suelo**

En la ilustración 47 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 47. Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo 2



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cal del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
 - ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cemento, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.
- ✓ **Suelo 3**

En la tabla 19 se presentan los resultados del análisis del efecto del cemento en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 19. Efecto de la adición del cemento. Suelo 3

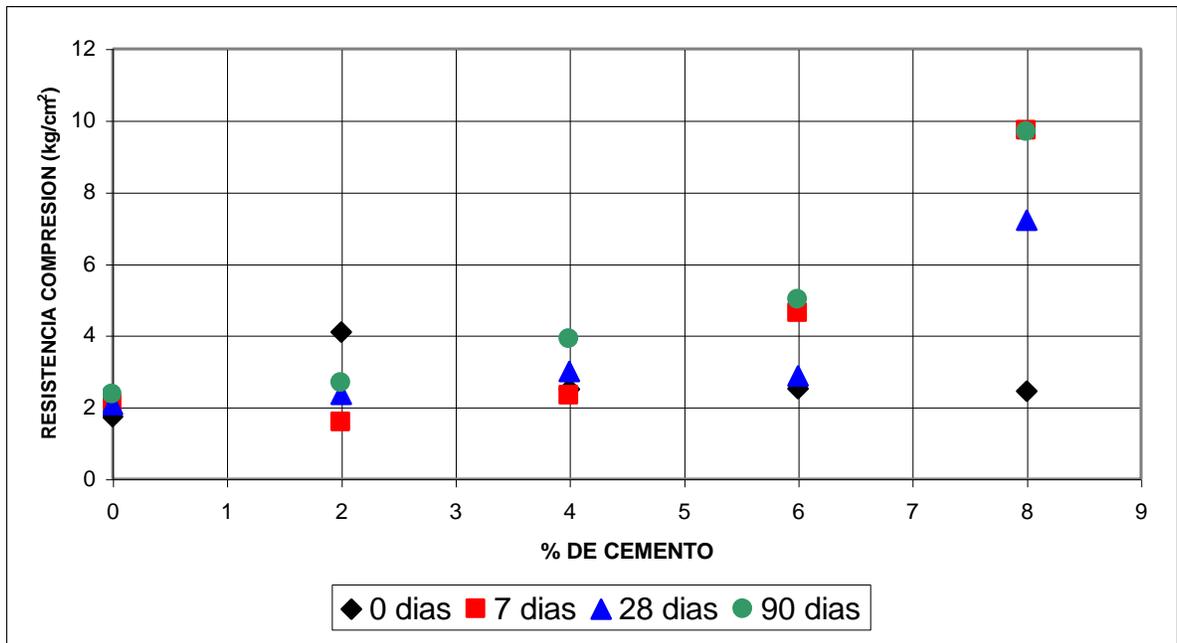
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	1,74	2,07	2,08	2,35	2,85	2,85	2,14	1,42	31,6	30,5	37,2	32,5	5,5
2% de cemento	4,10	1,58	2,35	2,68	3,56	2,14	1,42	2,85	26,0	26,4	25,6	26,3	11,0
4% de cemento	2,50	2,32	2,99	3,90	2,85	2,49	1,42	2,49	25,9	26,1	24,8	25,0	11,6
6% de cemento	2,51	4,63	2,87	5,00	2,85	2,85	1,78	3,21	27,1	26,8	26,7	25,1	11,8
8% de cemento	2,44	9,71	7,22	9,68	3,56	4,10	1,78	3,56	27,1	23,2	25,7	26,0	12,0

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 48 se muestra el efecto del cemento en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 48. Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 3



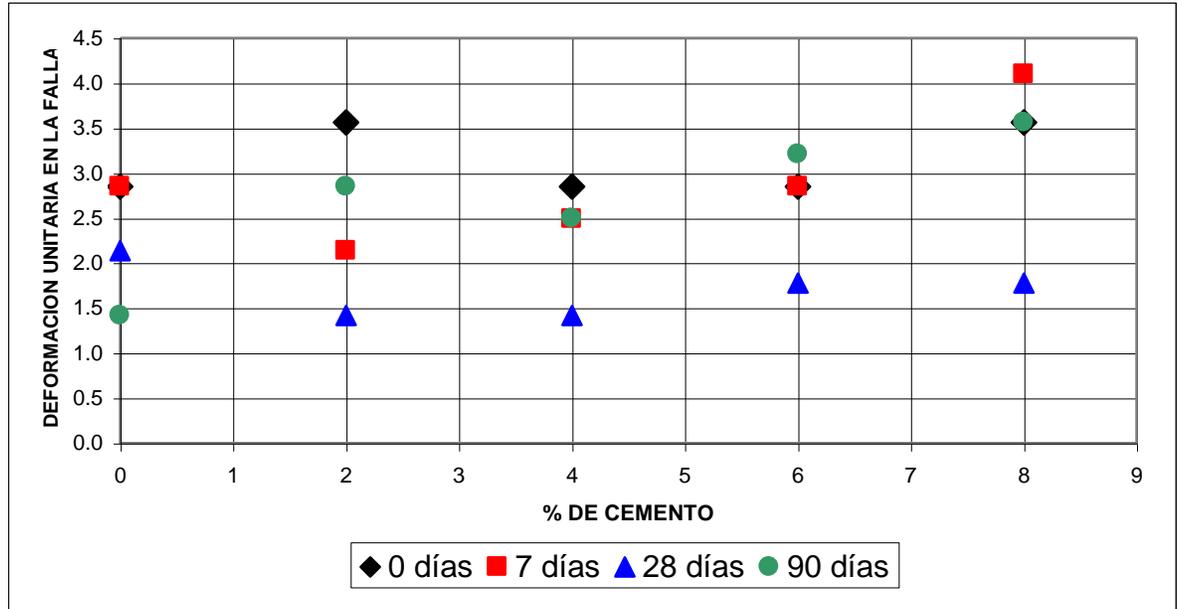
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes menores del 6% no se observan efectos significativos en la resistencia del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cemento del 8% se observan incrementos significativos en la resistencia del suelo.
- ✓ Después de los siete días de maduración se observan mayores incrementos en la resistencia con el tiempo que los apreciados en los otros suelos, pero estos no son significativos.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cemento.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 49 se muestra el efecto del cemento en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 49. Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla. Suelo 3



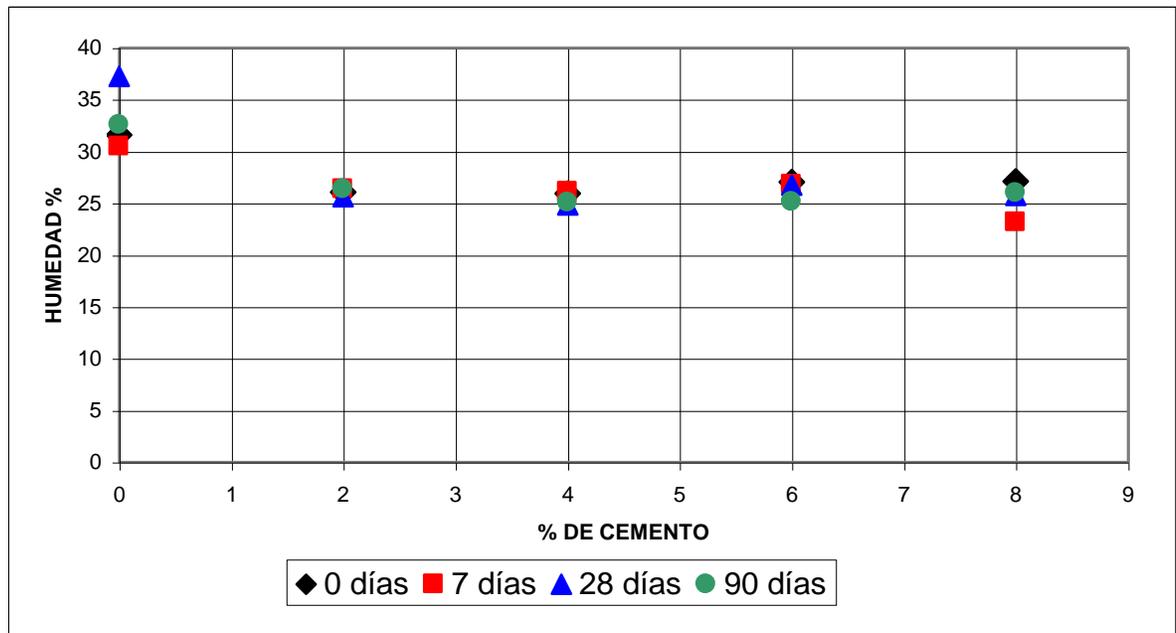
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observa una tendencia clara del efecto del cemento sobre la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Aparentemente la adición de cemento provoca una pequeña disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo, la cual se recupera con el aumento del periodo de maduración.
- ✓ La deformación unitaria menor se presenta para un periodo de maduración de 28 días.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad**

En la ilustración 50 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 50. Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad Suelo 3



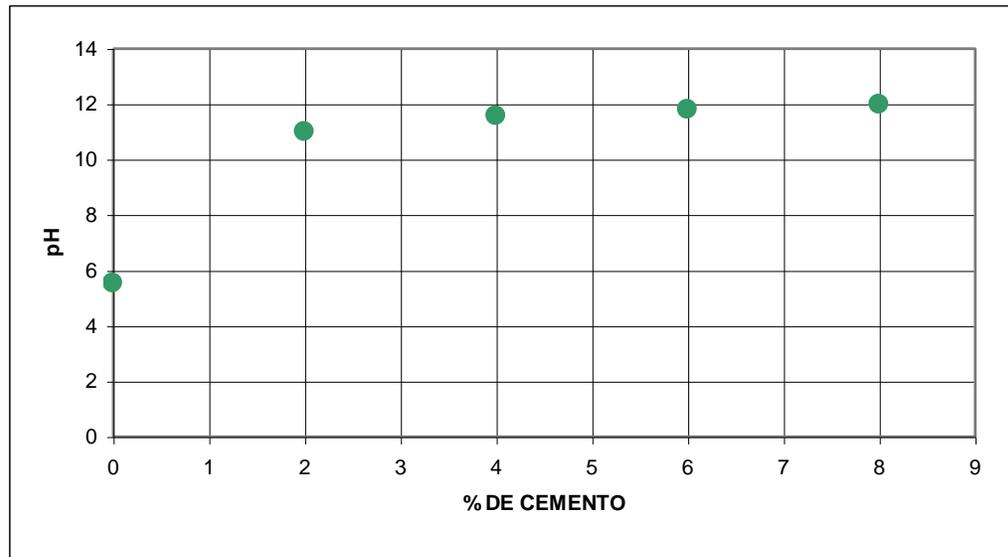
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de cemento en la variación de la humedad.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo**

En la ilustración 51 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 51. Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo 3



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cemento del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
 - ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cemento, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable.
- ✓ **Suelo 4**

En la tabla 20 se presentan los resultados del análisis del efecto del cemento en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 20. Efecto de la adición del cemento. Suelo 4

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)				Deformación unitaria en la falla				Humedad (%)				pH
	0	7	28	90	0	7	28	90	0	7	28	90	
Sin mejorar	1,07	1,26	1,78	1,75	7,84	6,41	6,41	4,99	42,9	41,1	MHD	40,3	5,0
2% de cemento	5,08	4,56	3,26	4,38	4,27	4,27	2,85	3,21	40,7	MHD	38,7	39,1	10,5
4% de cemento	4,50	5,62	4,78	6,20	3,56	2,85	1,78	2,85	40,1	MHD	37,9	39,1	11,5
6% de cemento	4,30	9,86	5,00	6,11	2,85	4,99	1,78	2,85	39,4	MHD	37,7	36,5	11,8
8% de cemento	3,93	9,25	7,22	8,63	2,85	3,56	1,78	3,21	38,9	MHD	37,1	37,7	11,9

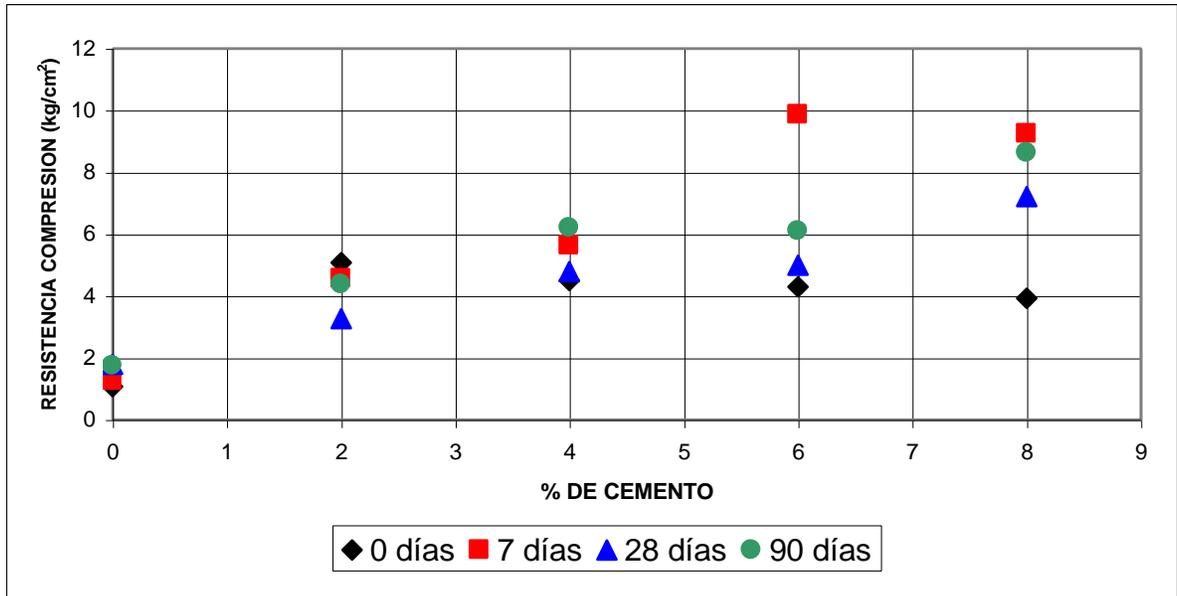
MHD: La muestra de humedad se dañó.

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 52 se muestra el efecto del cemento en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 52. Efecto del porcentaje de cemento en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 4



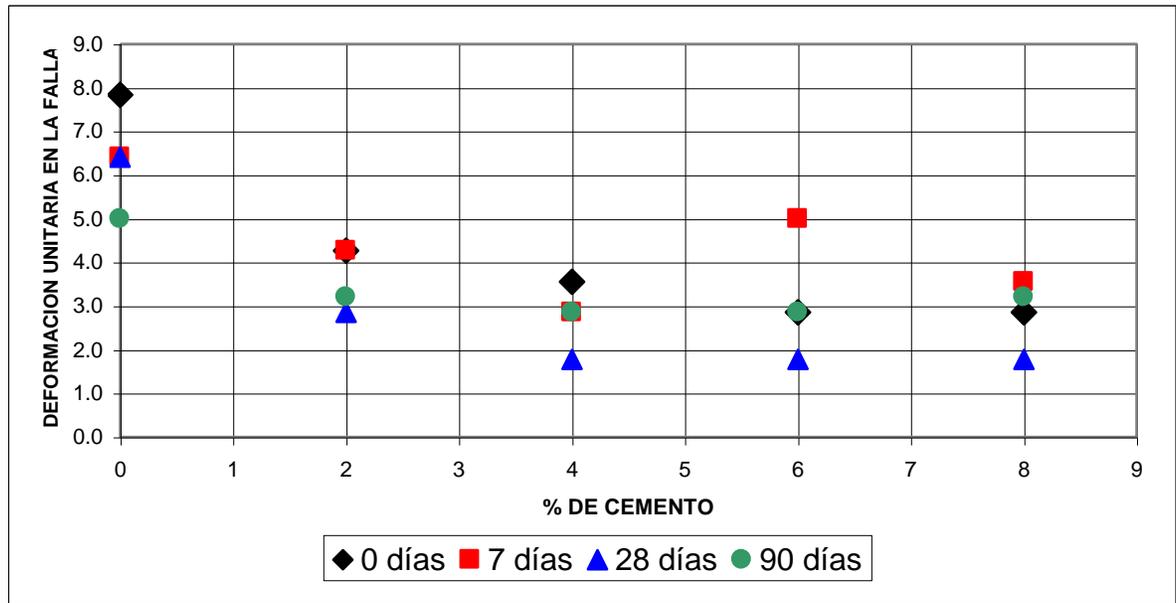
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de cemento entre el 2 y el 4% se observan efectos significativos en la resistencia del suelo.
- ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 4% no se observan incrementos significativos en la resistencia del suelo.
- ✓ Después de los siete días de maduración no se observan incrementos significativos en la resistencia con el tiempo, exceptuando el caso con el 6% de cemento.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de cemento.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 53 se muestra el efecto del cemento en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 53. Efecto del porcentaje de cemento en la deformación unitaria en la falla Suelo 4



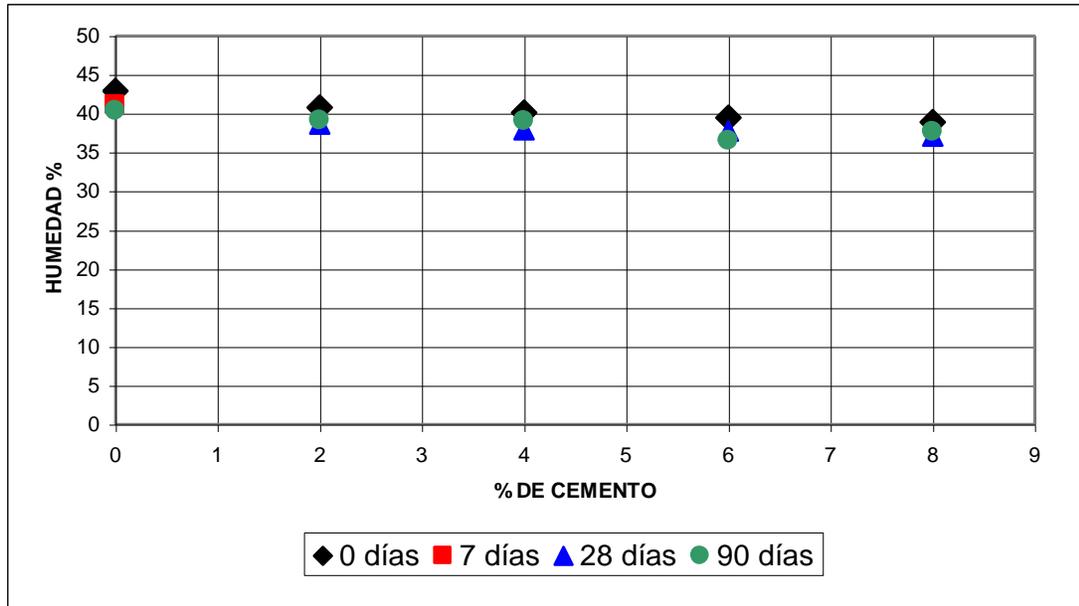
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Aparentemente la adición de cemento provoca una rebaja en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ A los 28 días se presenta la menor deformación unitaria.

➤ **Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad**

En la ilustración 54 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 54. Efecto del porcentaje de cemento en la variación de la humedad Suelo 4

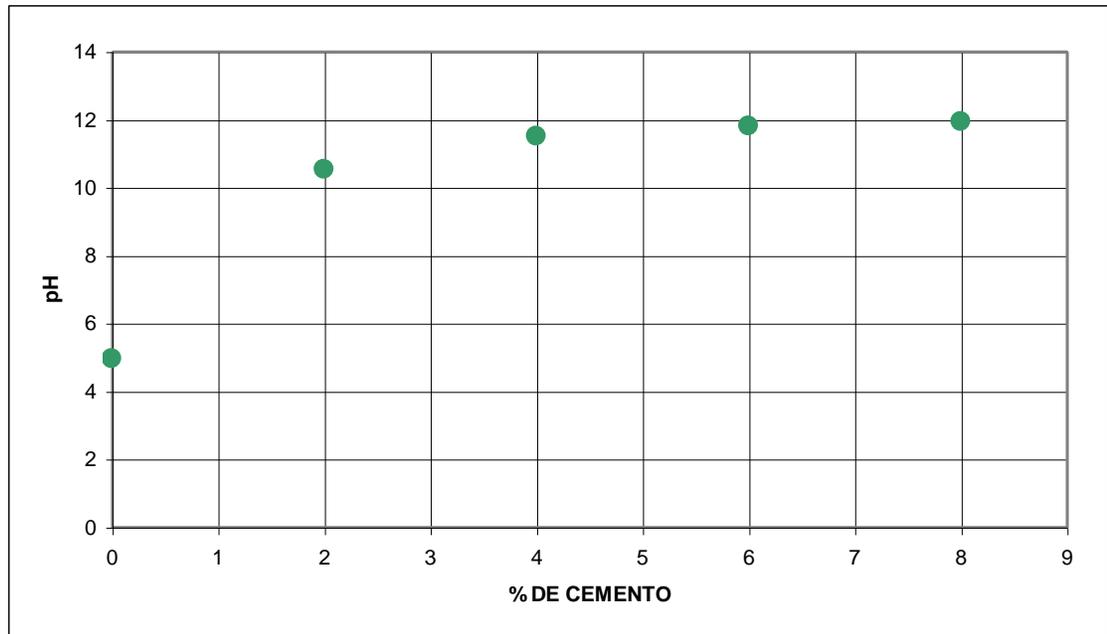


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Aparentemente la adición de cemento provoca una disminución en la humedad del suelo.
- **Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo**

En la ilustración 55 se muestra el efecto del cemento en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 55. Efecto del porcentaje de cemento en el pH del suelo 4



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de cemento del 2% el suelo presenta un fuerte incremento en el pH.
- ✓ Para porcentajes de cemento superiores al 2% el incremento en el pH no es significativo con respecto al pH con el 2% de cemento, pero comparado con el suelo sin estabilizar el incremento sigue siendo considerable

3.3. ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS.

3.3.1. Generalidades.

Con el fin de estudiar el efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Se elaboraron ciento ocho (108) briquetas harvard miniatura con mezclas de los suelos con la humedad óptima y porcentajes de dicloruro de sodio del 0.5%, 1%, 2% y 4%.
- ✓ Se envolvió cada una de las ciento ocho (108) briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.

- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briqueta.

3.3.2. Resultados

✓ Suelo 1

En la tabla 21 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 21. Efecto de la adición del dicloruro de sodio. Suelo 1

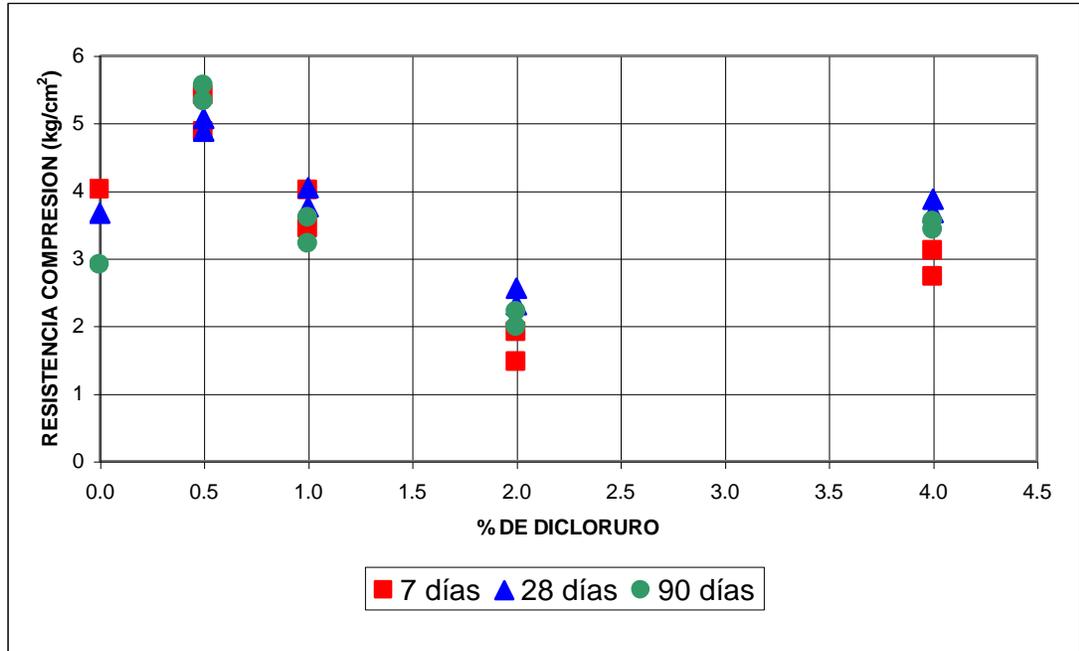
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
0,5% de dicloruro	5.41	4.88	5.56	5.34	5.70	4.99	49.41	51.12	47.20
0,5% de dicloruro	4.87	5.07	5.32	4.99	5.70	4.99	49.91	51.09	47.10
1% de dicloruro	4.01	3.76	3.60	8.55	7.12	7.12	49.83	50.58	50.76
1% de dicloruro	3.44	4.04	3.22	6.41	6.41	6.41	49.80	50.30	50.35
2% de dicloruro	1.47	2.31	1.98	7.84	9.97	10.69	52.81	52.54	52.56
2% de dicloruro	1.91	2.56	2.21	12.11	11.40	12.82	53.24	52.48	52.67
4% de dicloruro	2.73	3.87	3.55	7.12	7.84	8.55	50.06	51.41	51.12
4% de dicloruro	3.11	3.68	3.42	7.12	7.12	6.41	50.62	50.70	51.28

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 56 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 56. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 1

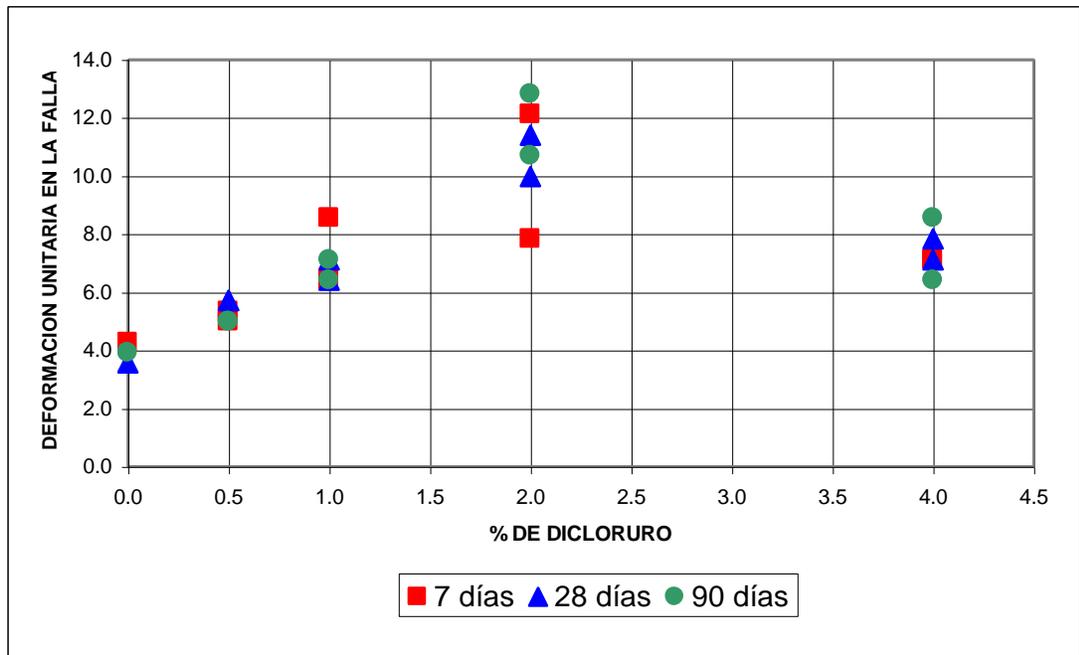


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de dicloruro del 0.5% se obtiene una mejora en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro superiores al 0.5% se observa una disminución en la resistencia la cual es mayor para un porcentaje de dicloruro del 2%.
 - ✓ Para un porcentaje de dicloruro del 4% se observa que el suelo recupera su resistencia original.
 - ✓ No se observa influencia del periodo de maduración en el efecto del estabilizante.
 - ✓ La reacción del suelo ante la adición del dicloruro de sodio es favorable para pequeñas cantidades, para cantidades superiores su efecto es perjudicial para la resistencia del suelo.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla.**

En la ilustración 57 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 57. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 1

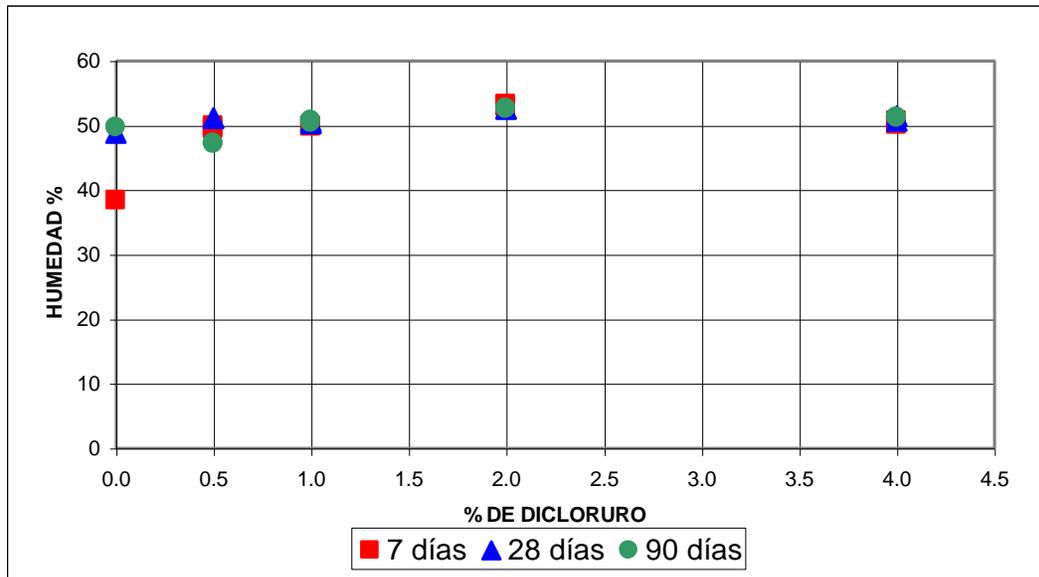


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa el porcentaje de dicloruro aumenta la deformación unitaria en la falla de la muestra, lo cual ocurre hasta porcentajes del 2%, para valores superiores la deformación unitaria en la falla empieza a disminuir.
 - ✓ No se observa efecto del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla del suelo.
 - ✓ El mayor incremento en la deformación unitaria se presenta para un porcentaje del 2%.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad.**

En la ilustración 58 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 58.. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad. Suelo 1



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de dicloruro en la variación de la humedad.

✓ **Suelo 2**

En la tabla 22 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 22. Efecto de la adición del dicloruro de sodio. Suelo 2

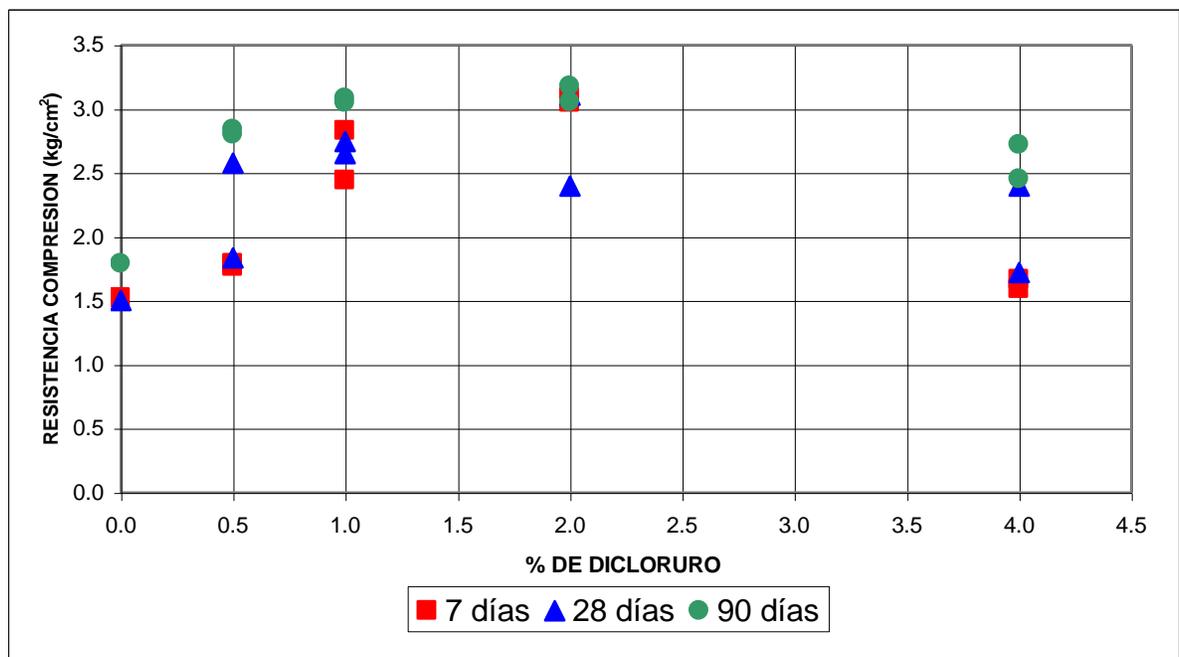
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,85	33,09	30,30
0,5% de dicloruro	1.76	1.84	2.80	10.69	9.26	7.12	27.64	27.77	27.02
0,5% de dicloruro	1.79	2.58	2.84	9.26	7.12	6.41	27.57	26.78	26.72
1% de dicloruro	2.44	2.65	3.05	4.27	4.99	5.70	26.56	26.26	26.17
1% de dicloruro	2.83	2.74	3.08	4.99	6.41	5.70	25.60	26.25	26.56
2% de dicloruro	3.09	3.11	3.05	4.99	6.77	4.99	24.36	24.26	24.48
2% de dicloruro	3.05	2.40	3.18	4.27	3.56	5.70	24.41	24.58	24.32
4% de dicloruro	1.66	1.72	2.45	19.24	14.96	7.12	26.98	26.62	25.94
4% de dicloruro	1.59	2.40	2.72	16.39	8.55	7.12	25.48	26.31	25.56

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 59 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 59. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 2



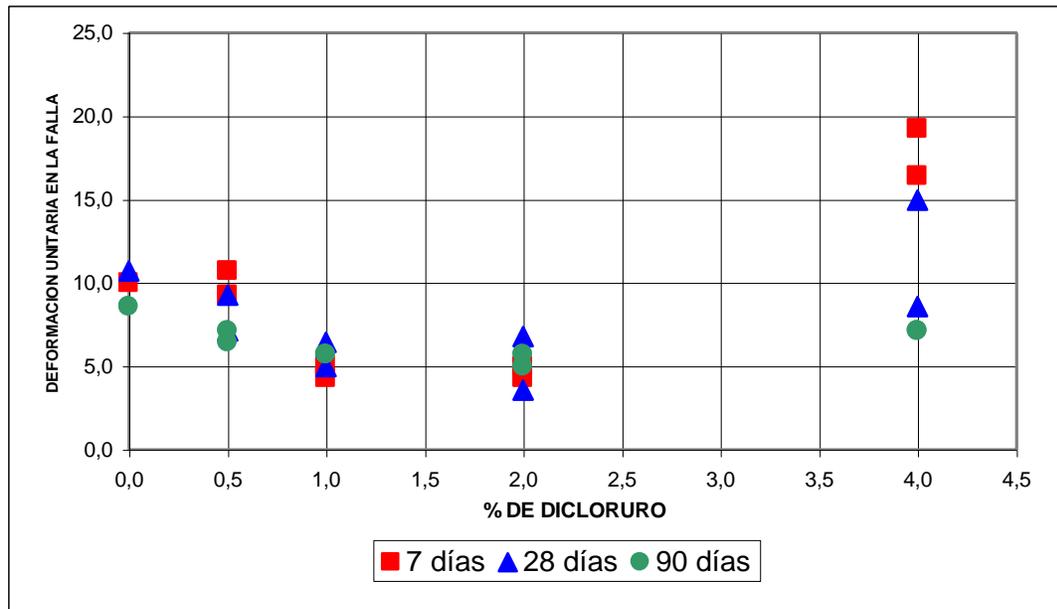
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro genera un aumento en la resistencia del suelo.
- ✓ Para porcentajes de dicloruro del 4% o menos a medida que aumenta la cantidad de dicloruro aumenta la resistencia del suelo.
- ✓ Para porcentajes de dicloruro mayores del 4% empieza a disminuir la resistencia en la medida que aumenta la cantidad de dicloruro.
- ✓ Aparentemente a medida que aumenta el periodo de maduración del suelo aumenta la resistencia.

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla.**

En la ilustración 60 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 60. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 2



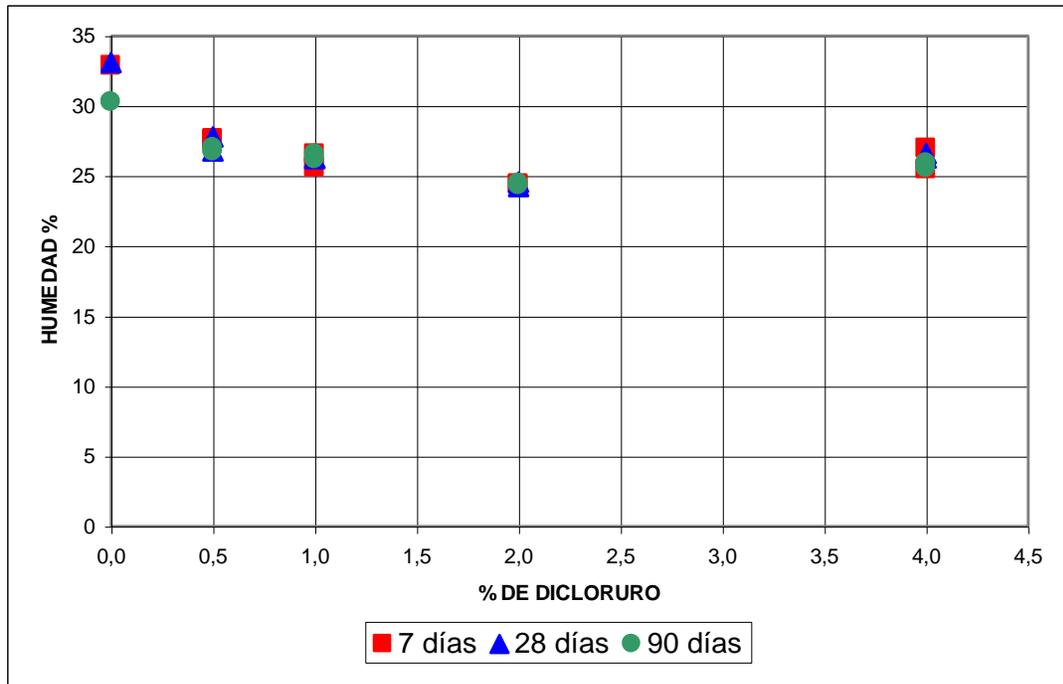
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Se observa que para porcentajes de dicloruro del 2% o menores se obtiene una disminución en la deformación unitaria en la falla
- ✓ Para porcentajes de dicloruro mayores del 2% se incrementa la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Cuando los porcentajes de dicloruro son del 2% o menores la deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que aumenta la cantidad de dicloruro.
- ✓ No se observan efectos del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla, exceptuando el 4% de dicloruro de sodio que a mayor periodo de maduración la deformación unitaria disminuye.

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad**

En la ilustración 61 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 61. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad. Suelo 2



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Aparentemente la adición de dicloruro provoca una disminución en la humedad del suelo.
- ✓ Para cantidades de dicloruro del 2% o menores se observa que la disminución de la humedad es mayor en la medida que aumenta la cantidad de dicloruro de sodio.
- ✓ Para cantidades de dicloruro mayores al 2% la humedad del suelo empieza a aumentar. En la medida que aumenta la cantidad de dicloruro de sodio.
- ✓ No se observa efecto significativo del periodo de maduración sobre la variación de la humedad del suelo.
- ✓ La resistencia y la deformación unitaria son sensibles a la humedad de compactación.

✓ **Suelo 3**

En la tabla 23 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 23. Efecto de la adición del dicloruro de sodio. Suelo 3

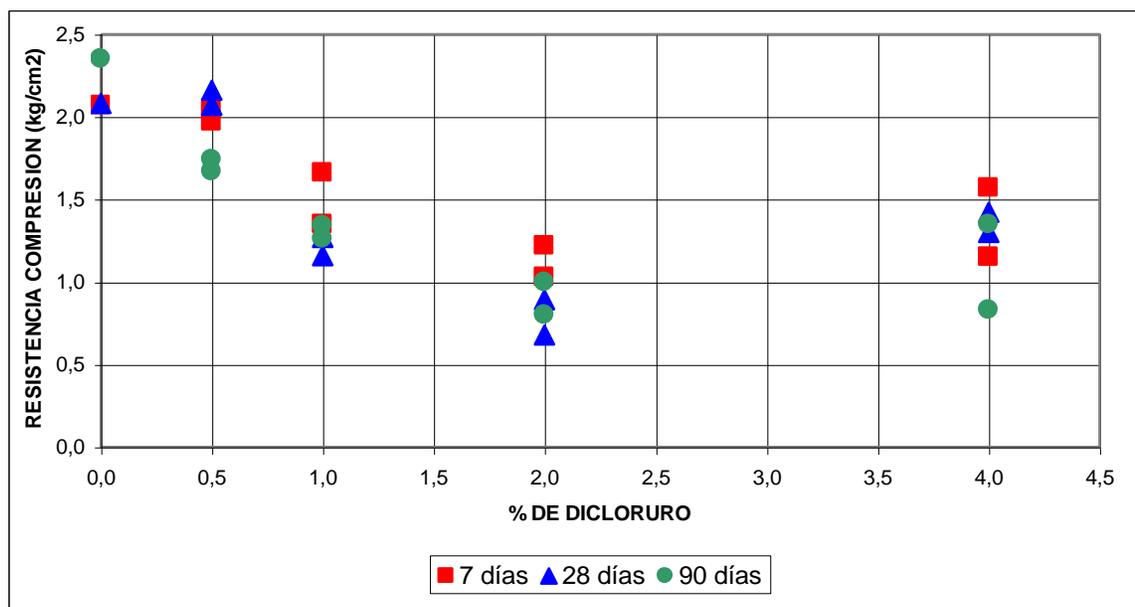
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	2,07	2,08	2,35	2,85	2,14	1,42	30,49	37,24	32,54
0,5% de dicloruro	2.05	2.07	1.74	2.85	2.85	2.85	28.74	29.01	28.01
0,5% de dicloruro	1.97	2.16	1.67	2.85	3.21	2.85	28.75	28.50	27.42
1% de dicloruro	1.66	1.16	1.34	7.12	4.99	6.41	42.24	40.18	40.19
1% de dicloruro	1.35	1.27	1.26	5.70	6.41	5.70	39.78	40.70	40.53
2% de dicloruro	1.03	0.68	1.00	6.41	6.41	7.12	42.93	40.14	40.49
2% de dicloruro	1.22	0.89	0.80	7.12	4.63	7.12	40.32	40.74	41.40
4% de dicloruro	1.57	1.30	1.35	4.99	3.56	3.56	36.46	36.49	32.23
4% de dicloruro	1.15	1.42	0.83	3.56	3.92	2.85	36.75	36.85	36.47

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 62 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 62. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 3



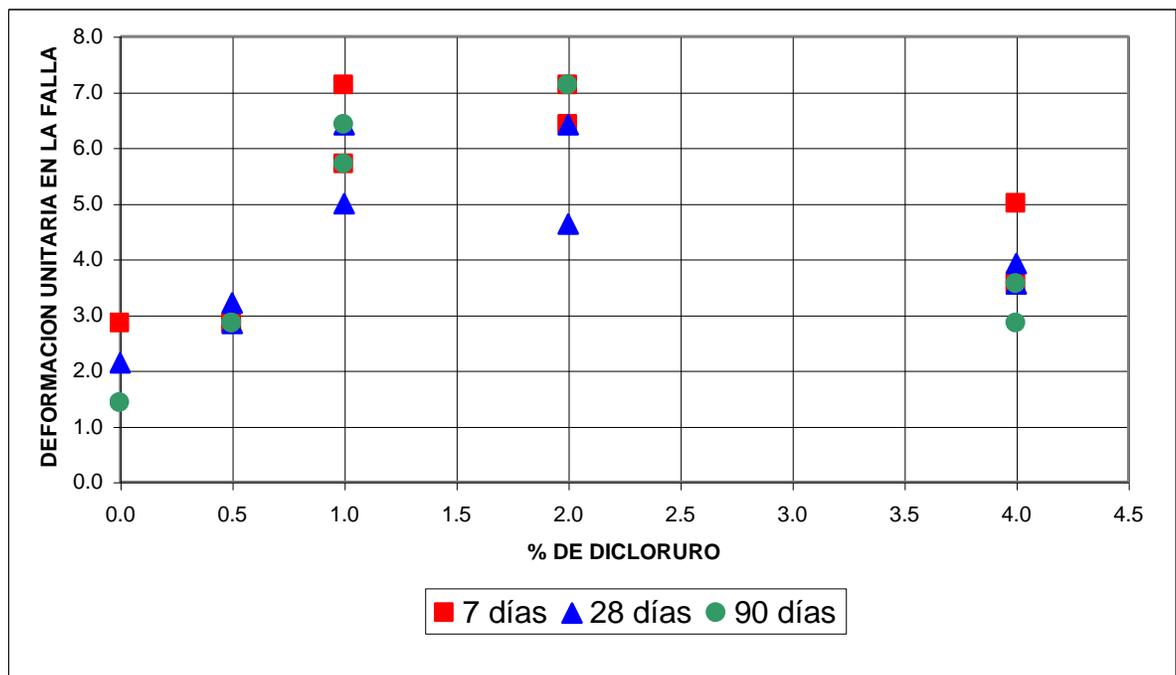
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa el porcentaje de dicloruro disminuye la resistencia.
- ✓ Para porcentajes mayores del 2% se observa una leve recuperación en la resistencia del suelo.
- ✓ La adición de dicloruro provoca una disminución en la resistencia del suelo.
- ✓ No se observa influencia del periodo de maduración en la resistencia del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 63 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 63. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 3

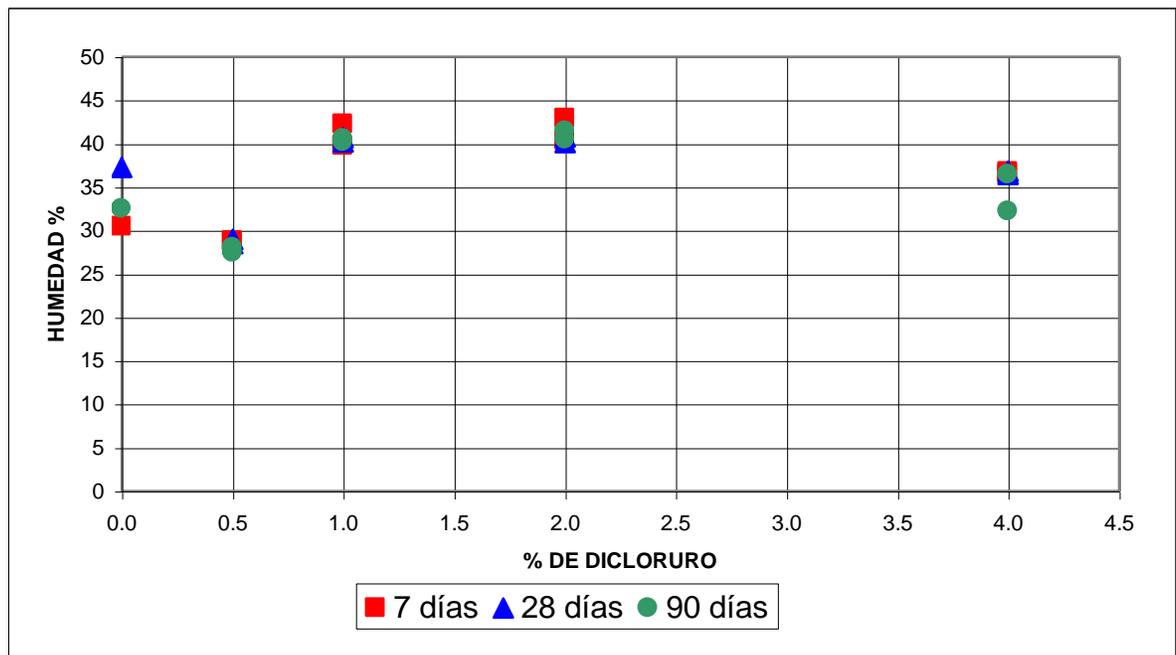


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para valores de dicloruro entre del 2% o menores la deformación unitaria en la falla se incrementa considerablemente en la medida que aumenta la cantidad de dicloruro.
 - ✓ Para contenidos de dicloruro del 2% o mayores la deformación unitaria en la falla empieza a disminuir.
 - ✓ No se observa efecto del periodo de curado en la deformación unitaria en la falla.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad.**

En la ilustración 64 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 64. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad. Suelo 3



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro genera incrementos en el contenido de humedad del suelo, el cual es mayor para valores comprendidos entre el 1 y 2%.
- ✓ La adición del 0.5% de dicloruro genera una disminución en el contenido de humedad del suelo.

- ✓ No se observa efecto del curado en la variación del contenido de humedad del suelo.
- ✓ Con el 4% de dicloruro de sodio, la humedad vuelve a disminuir levemente.

✓ **Suelo 4**

En la tabla 24 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 24. Efecto de la adición del dicloruro de sodio. Suelo 4

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,26	1,78	1,75	6,41	6,41	4,99	41,05	MHD	40,33
0,5% de dicloruro	3.11	2.99	2.55	3.21	2.49	2.14	37.02	37.30	37.25
0,5% de dicloruro	2.94	3.14	2.97	2.85	2.85	2.49	36.86	37.35	38.00
1% de dicloruro	2.94	2.99	3.49	2.85	2.85	3.21	37.28	37.96	36.99
1% de dicloruro	3.18	2.89	3.18	3.21	2.85	3.56	37.47	37.63	37.19
2% de dicloruro	3.63	3.32	3.99	3.56	2.49	3.92	36.17	36.37	35.97
2% de dicloruro	3.16	2.96	3.78	2.85	3.21	3.92	34.15	37.01	37.03
4% de dicloruro	3.50	3.50	2.94	2.85	2.85	3.92	35.70	36.00	36.06
4% de dicloruro	3.44	3.07	3.22	2.85	2.49	3.56	35.51	36.63	35.56

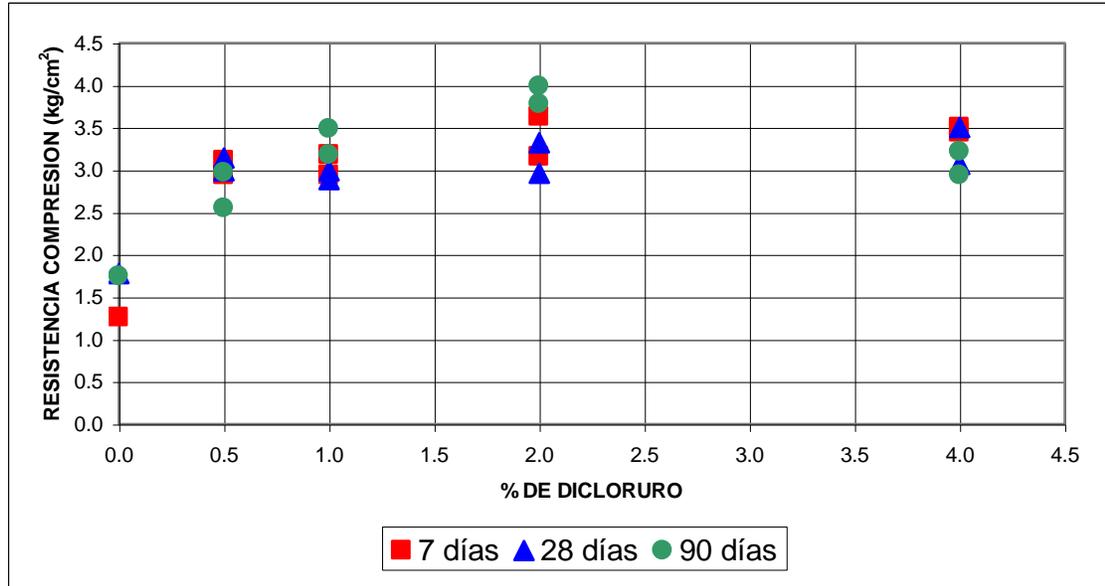
MHD: La muestra de humedad se dañó.

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 65 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 65. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada. Suelo 4



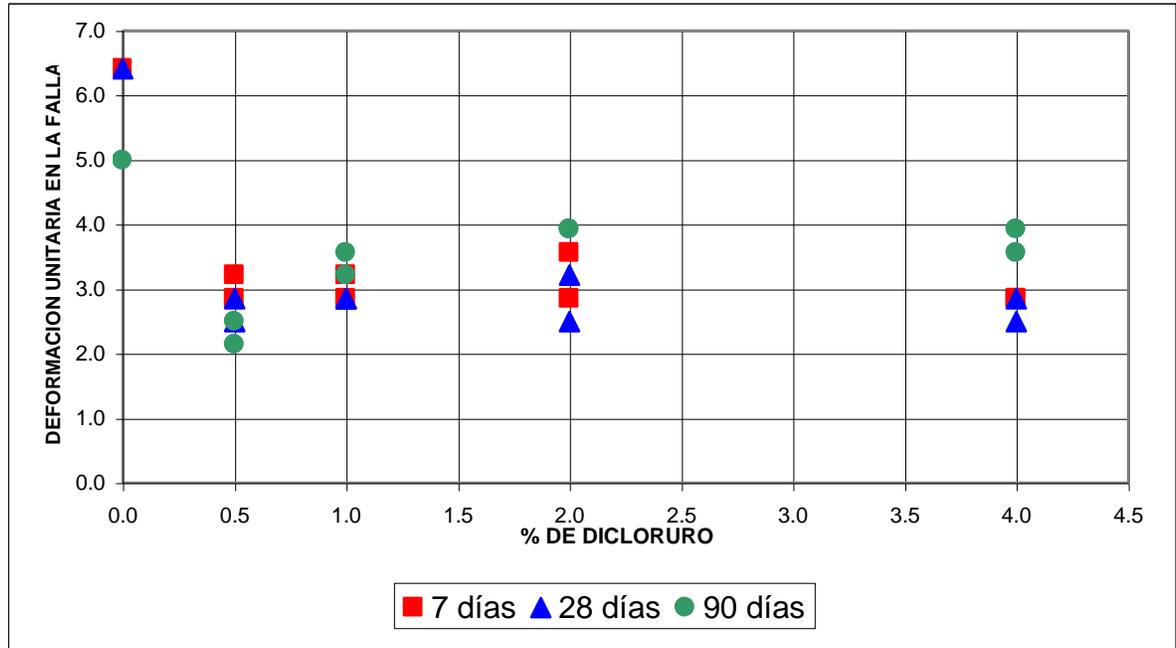
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de dicloruro del 2% o menores se observa que la resistencia aumenta en la medida que aumenta la cantidad de dicloruro.
- ✓ Para porcentajes de dicloruro superiores al 2% se observa una leve disminución en la resistencia con el incremento de la cantidad de dicloruro.
- ✓ No se observa claramente el efecto del periodo de curado en la resistencia del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 66 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 66. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 4

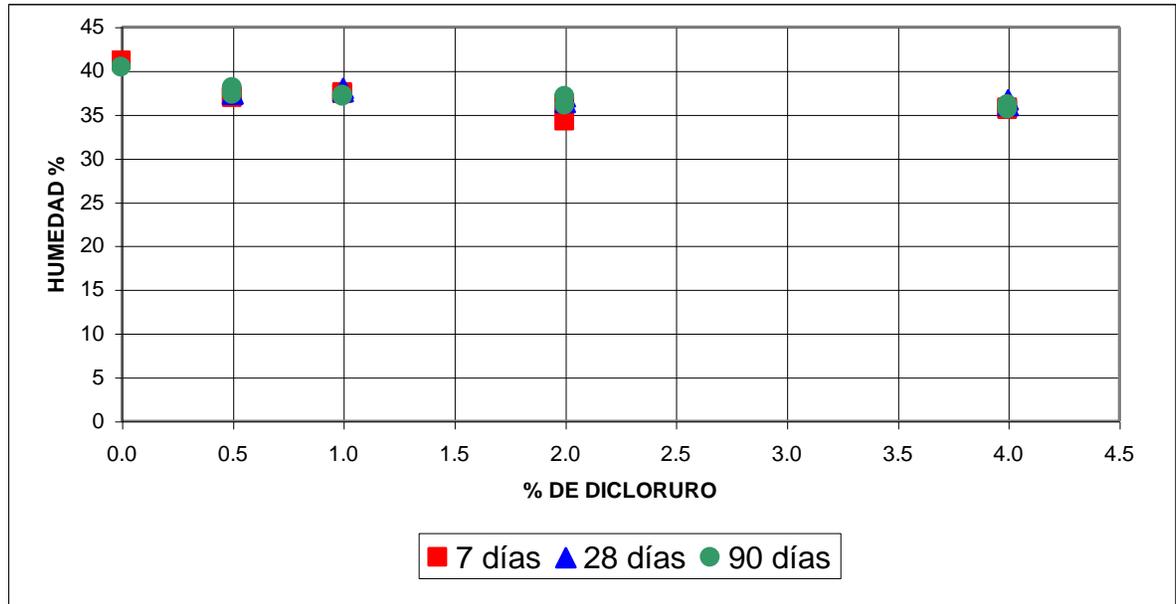


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro de sodio provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro del 0.5% en la medida que aumenta el periodo de curado disminuye la deformación unitaria en la falla del suelo.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro mayores del 1% en la medida que aumenta el periodo de curado aumenta la deformación unitaria en la falla.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro del 2% o menos en la medida que aumenta el porcentaje de dicloruro aumenta la deformación unitaria en la falla.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro superiores al 2% no se observan variaciones significativas en la deformación unitaria en la falla.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad.**

En la ilustración 67 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 67. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la variación de la humedad. Suelo 4



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que aumenta el porcentaje de dicloruro disminuye la humedad del suelo.
- ✓ No se observan efectos del periodo de maduración en el contenido de humedad del suelo.

3.4. ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

3.4.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Se elaboraron ciento ocho (108) briquetas harvard miniatura con mezclas de los suelos con la humedad óptima y porcentajes de silicato de calcio del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las ciento ocho (108) briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.

- ✓ Se colocaron las muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión confinada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briqueta.

3.4.2. Resultados

✓ Suelo 1

En la tabla 25 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 25. Efecto de la adición del silicato de calcio suelo 1

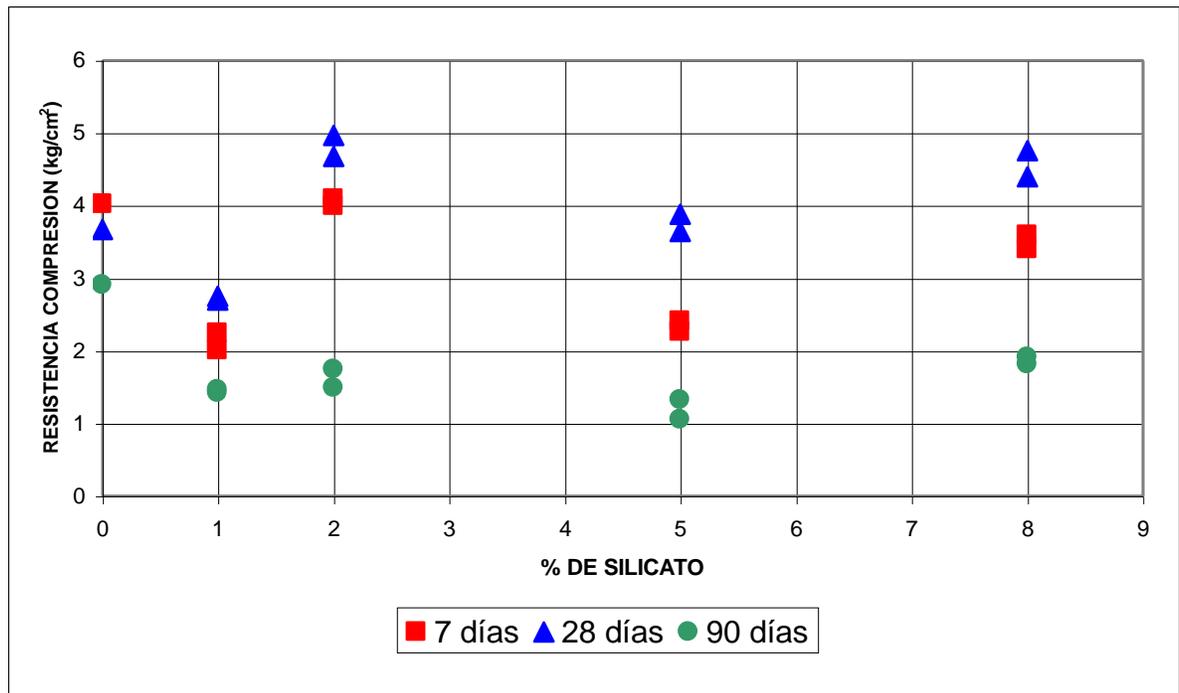
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
1% de silicato	2.24	2.70	1.46	8.55	7.12	2.49	50.20	52.23	30.13
1% de silicato	2.01	2.75	1.42	7.12	7.12	1.78	52.83	52.67	29.77
2% de silicato	3.99	4.68	1.74	5.34	6.06	2.49	47.61	48.98	30.32
2% de silicato	4.09	4.97	1.49	5.70	5.70	2.49	47.83	48.01	30.58
5% de silicato	2.41	3.64	1.05	3.56	4.99	1.78	50.07	50.39	32.15
5% de silicato	2.26	3.88	1.32	5.70	4.99	1.78	49.60	50.17	31.40
8% de silicato	3.59	4.40	1.91	2.85	2.85	2.49	47.74	48.17	30.96
8% de silicato	3.40	4.76	1.81	2.49	3.56	2.49	48.21	47.63	30.98

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada.**

En la ilustración 68 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 68. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 1



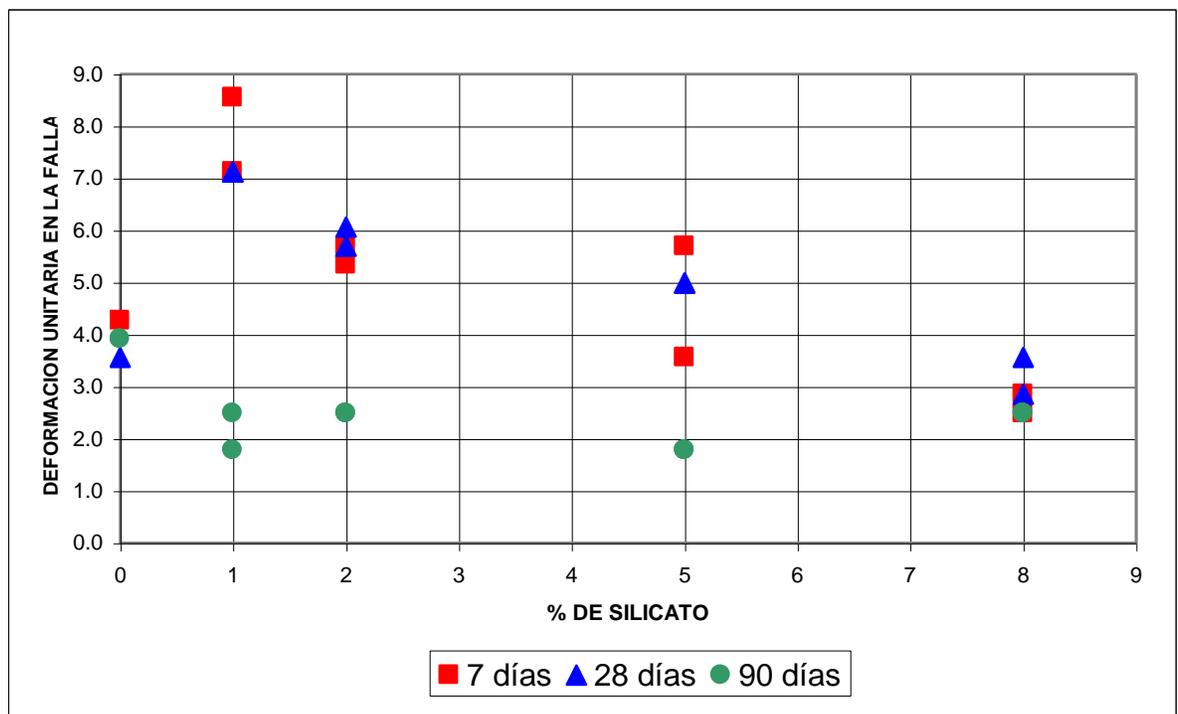
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentaje de silicato de calcio del 1% se observa una disminución en la resistencia del suelo.
- ✓ Para un porcentaje del 2% se obtiene un incremento de la resistencia a los 28 días pero a los 90 días la resistencia cae a niveles inferiores a los del suelo sin mejorar.
- ✓ Para porcentajes del 5% o superiores se observa un leve incremento en la resistencia la cual se pierde con el tiempo generándose un decremento a niveles menores a los del suelo sin mejorar.
- ✓ La resistencia a los 90 días es inferior a todas.
- ✓ A partir del 2% de silicato de calcio, las mayores resistencias se presentan a los 28 días.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 69 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 69. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 1



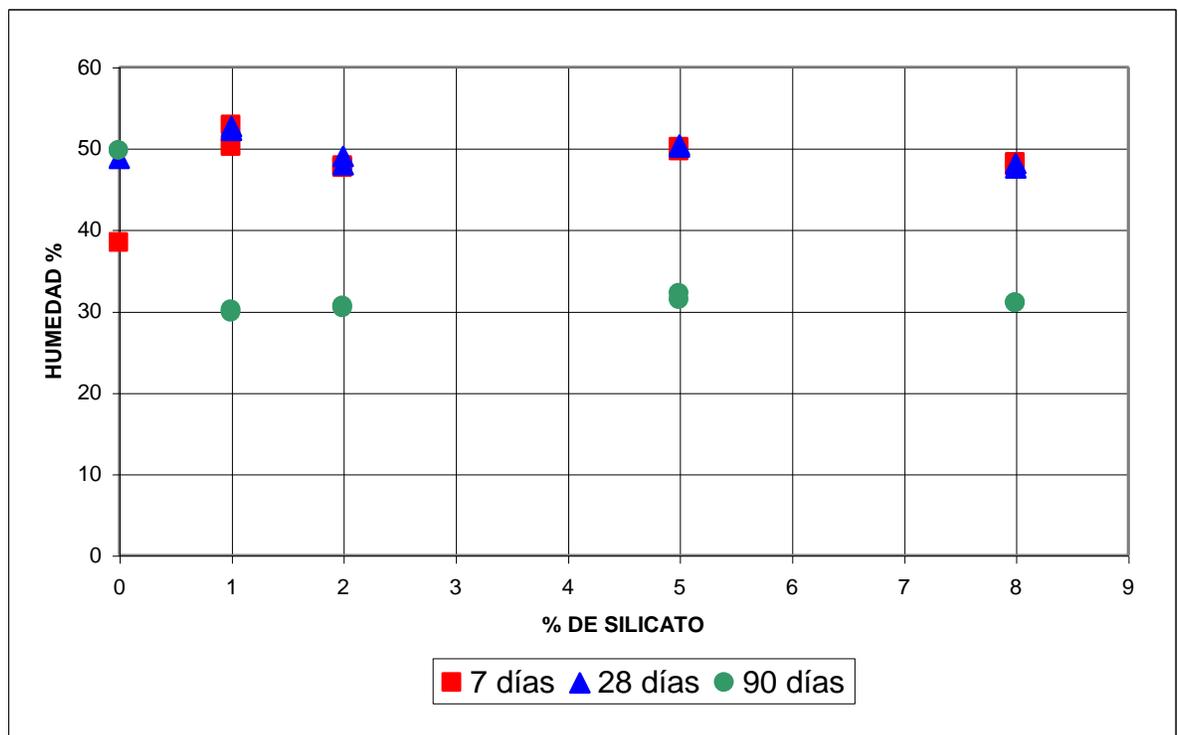
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Al adicionar el 1% de silicato inicialmente se obtiene un fuerte incremento en la deformación unitaria en la falla, pero con el tiempo este se pierde disminuyendo a niveles inferiores a las que presenta el suelo sin mejorar.
- ✓ Para porcentajes superiores al 1% de silicato el incremento en la deformación unitaria empieza a disminuir en la medida que aumenta el porcentaje de silicato.
- ✓ Después de los 28 días de curado la deformación unitaria en la falla empieza a disminuir hasta niveles inferiores a los del suelo inicial.

- ✓ Con el tiempo se vuelve más rígida y menos resistente.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad**

En la ilustración 70 se muestra el efecto del silicato de calcio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 70. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad. Suelo 1



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un periodo de maduración de 7 y 28 días no se observan cambios significativos en la humedad para los diferentes porcentajes de silicato.
- ✓ Para un periodo de curado de 90 días se observa que la humedad disminuye considerablemente en todos los porcentajes de silicato.

✓ **Suelo 2**

En la tabla 26 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 26. Efecto de la adición del silicato de calcio. Suelo 2

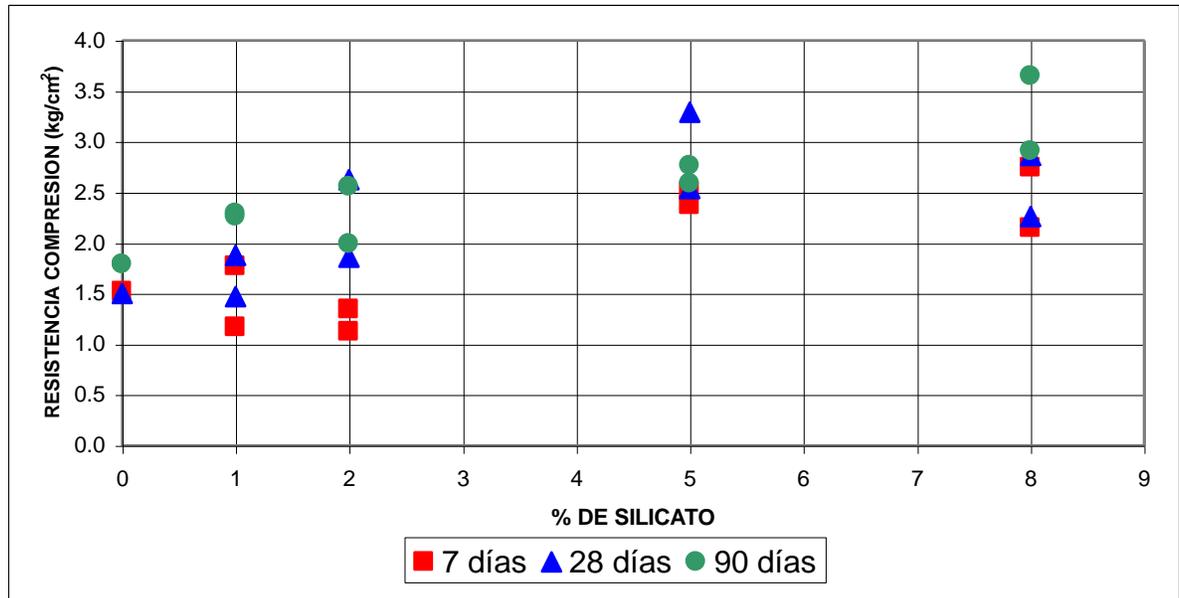
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,85	33,09	30,30
1% de silicato	1.17	1.47	2.26	7.12	9.26	4.99	26.09	26.68	26.62
1% de silicato	1.77	1.88	2.29	7.84	5.70	6.41	26.01	25.61	26.49
2% de silicato	1.12	1.86	1.99	7.12	4.99	6.41	25.58	25.67	25.89
2% de silicato	1.34	2.63	2.56	9.26	6.41	4.27	26.08	25.90	25.71
5% de silicato	2.51	2.54	2.59	4.27	4.99	4.27	24.59	26.12	26.15
5% de silicato	2.37	3.29	2.76	5.70	5.70	4.99	25.91	25.92	25.67
8% de silicato	2.15	2.87	3.65	4.27	5.34	4.63	24.01	23.89	25.78
8% de silicato	2.74	2.26	2.91	5.70	5.70	4.99	24.31	25.48	25.84

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 71 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 71. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada. Suelo 2

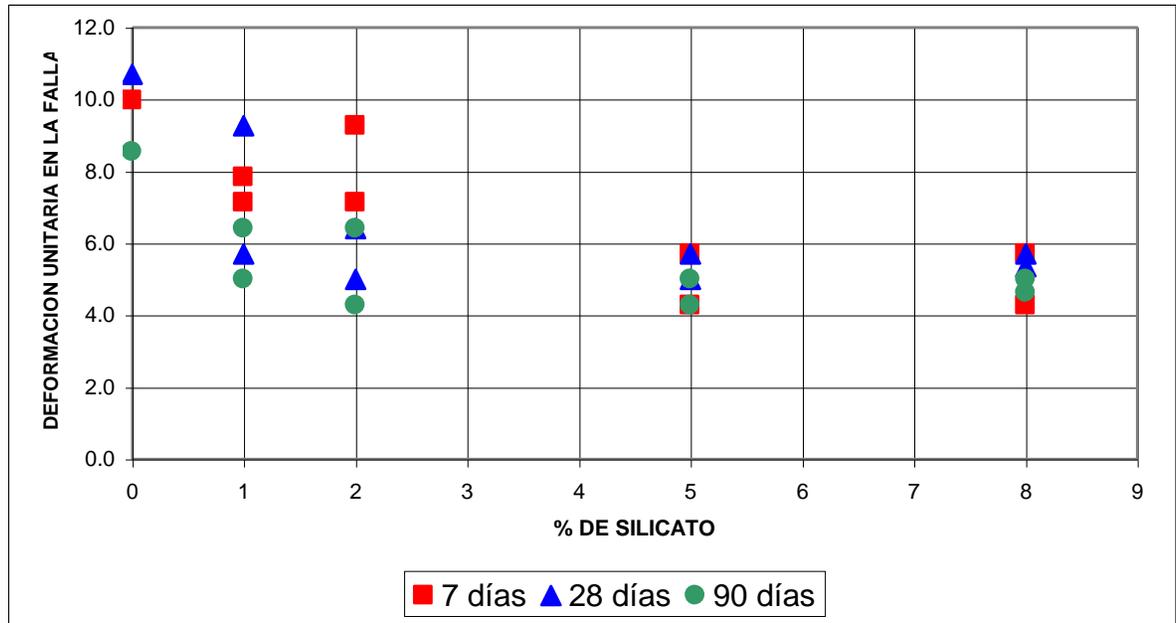


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Se observa un incremento de la resistencia en la medida que se incrementa el porcentaje de silicato.
 - ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se observa un incremento en la resistencia.
 - ✓ Con un porcentaje entre el 1 y 2% la resistencia a los 7 días disminuye con respecto al suelo solo, pero con el periodo de maduración, la resistencia aumenta.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 72 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 72. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 2

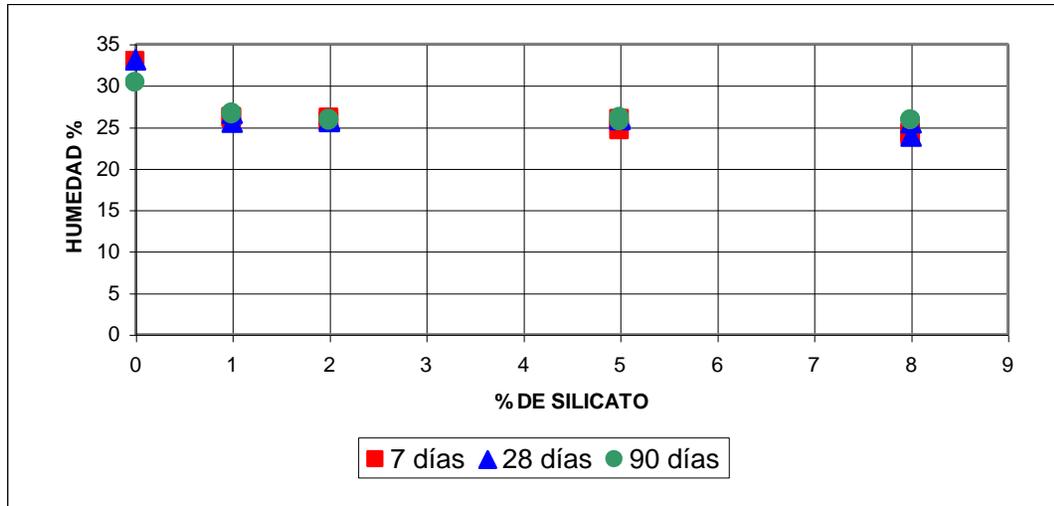


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Se observa una disminución de la deformación unitaria en la falla en la medida que se incrementa la cantidad de silicato.
 - ✓ Después del 5%, los incrementos en la cantidad de silicato de calcio, no son significativos en la deformación unitaria en la falla.
 - ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la deformación unitaria en la falla del suelo.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad.**

En la ilustración 73 se muestra el efecto del silicato de calcio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 73. Efecto del porcentaje del silicato de calcio en la variación de la humedad. Suelo 2



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato provoca una disminución en el contenido de humedad del suelo.
 - ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de silicato en la variación de la humedad.
- ✓ **Suelo 3**

En la tabla 27 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 27. Efecto de la adición del silicato de calcio. Suelo 3

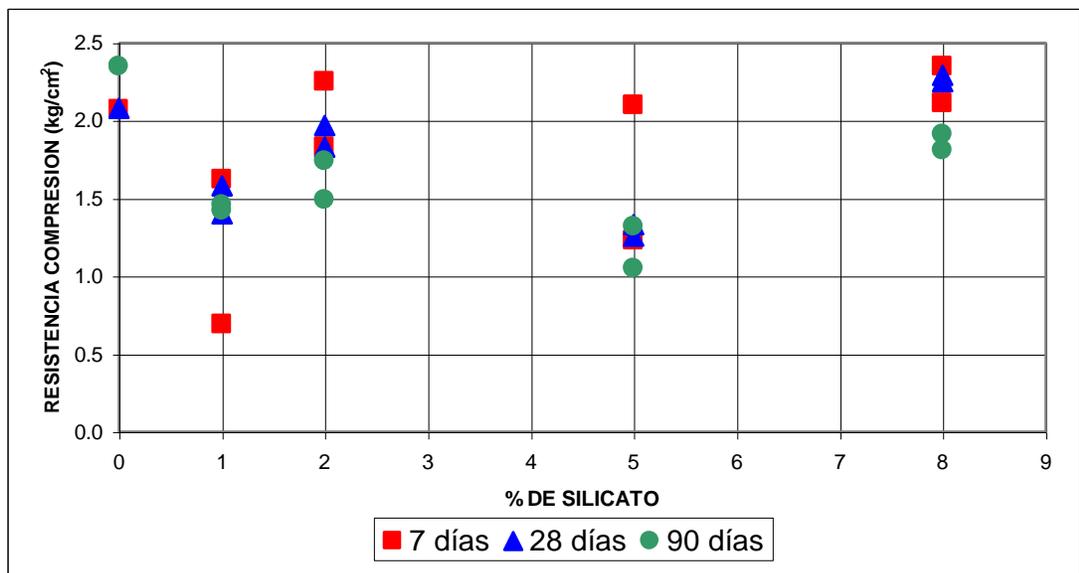
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	2,07	2,08	2,35	2,85	2,14	1,42	30,49	37,24	32,54
1% de silicato	0.69	1.40	1.46	1.42	2.14	2.49	32.20	30.31	30.13
1% de silicato	1.62	1.58	1.42	2.85	2.49	2.14	29.37	30.58	29.77
2% de silicato	1.83	1.97	1.74	2.14	2.85	2.49	30.32	28.72	30.32
2% de silicato	2.25	1.83	1.49	2.85	2.85	2.49	29.62	29.80	30.58
5% de silicato	1.23	1.33	1.05	2.14	2.49	1.78	33.23	33.19	32.15
5% de silicato	2.10	1.26	1.32	2.85	2.85	1.78	32.18	33.79	31.40
8% de silicato	2.11	2.29	1.91	2.14	2.49	2.49	31.16	30.79	30.96
8% de silicato	2.35	2.25	1.81	2.85	2.85	2.49	31.43	31.02	30.98

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 74 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 74. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 3



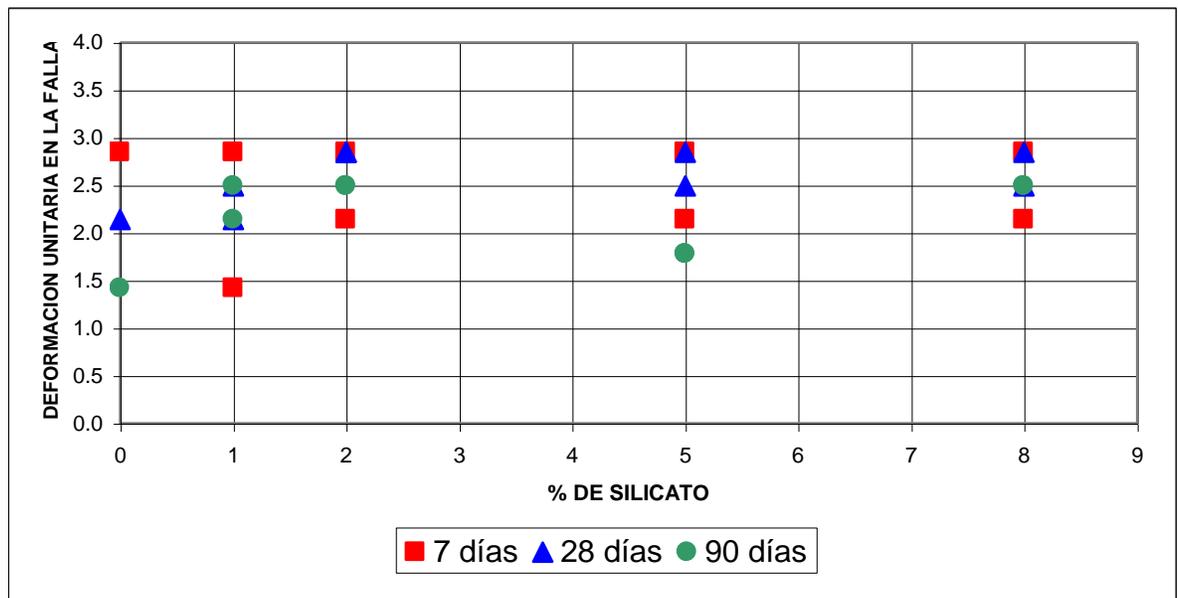
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje del 5% de silicato se observa una disminución en la resistencia del suelo.
- ✓ Para porcentajes de silicato mayores al 5% en la medida que aumenta la cantidad de silicato se incrementa la resistencia del suelo.
- ✓ Aparentemente en la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la resistencia del suelo.
- ✓ Porcentajes menores al 5% generan una disminución de la resistencia original.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 75 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 75. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 3



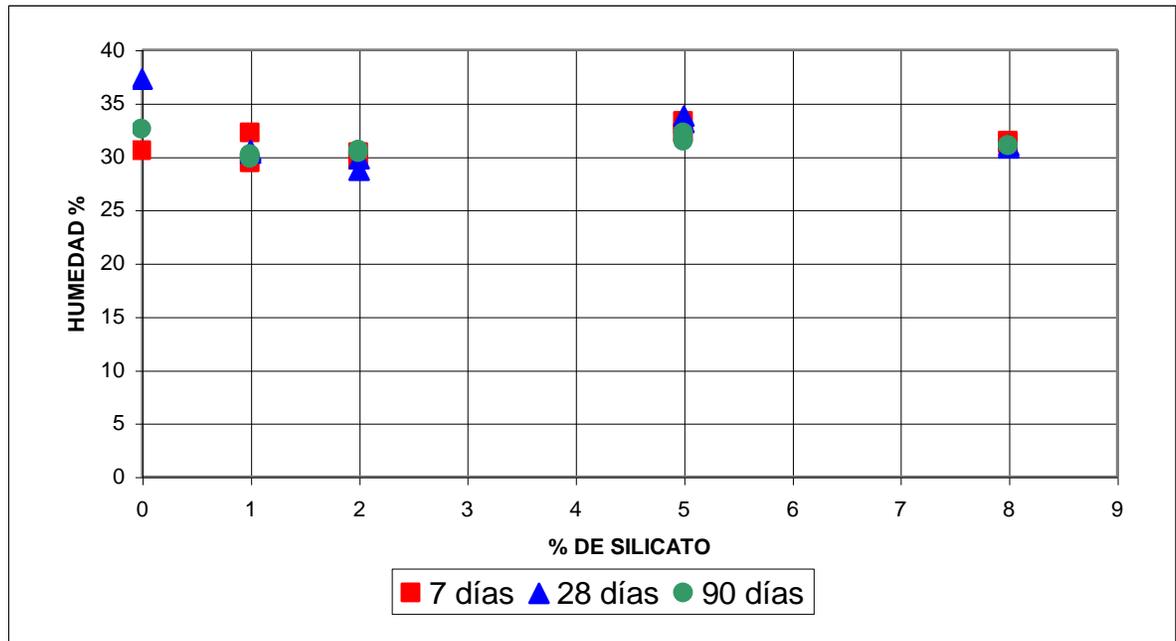
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observan efectos significativos del porcentaje de silicato o del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Con el 8% de silicato de calcio, las deformaciones son similares.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad**

En la ilustración 76 se muestra el efecto del silicato de calcio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 76. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad. Suelo 3



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje del silicato de calcio en la variación de la humedad.

✓ **Suelo 4**

En la tabla 28 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 28. Efecto de la adición del silicato de calcio. Suelo 4

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,26	1,78	1,75	6,41	6,41	4,99	41,05	MHD	40,33
1% de silicato	3.22	2.63	3.18	3.56	2.14	3.56	37.37	38.50	38.15
1% de silicato	2.89	3.04	3.02	2.85	2.85	2.85	37.52	38.14	37.09
2% de silicato	3.67	2.93	3.21	3.21	2.85	2.85	37.19	37.55	37.28
2% de silicato	3.31	4.18	3.64	2.85	2.85	2.85	37.19	36.75	36.71
5% de silicato	2.72	2.59	3.71	4.27	3.56	3.56	38.58	38.95	38.14
5% de silicato	2.58	2.71	3.66	3.56	3.56	3.56	38.66	39.24	38.47
8% de silicato	2.81	2.16	3.04	2.85	2.14	2.49	39.17	39.63	39.23
8% de silicato	3.54	2.80	2.31	2.85	3.21	3.21	39.08	39.07	39.29

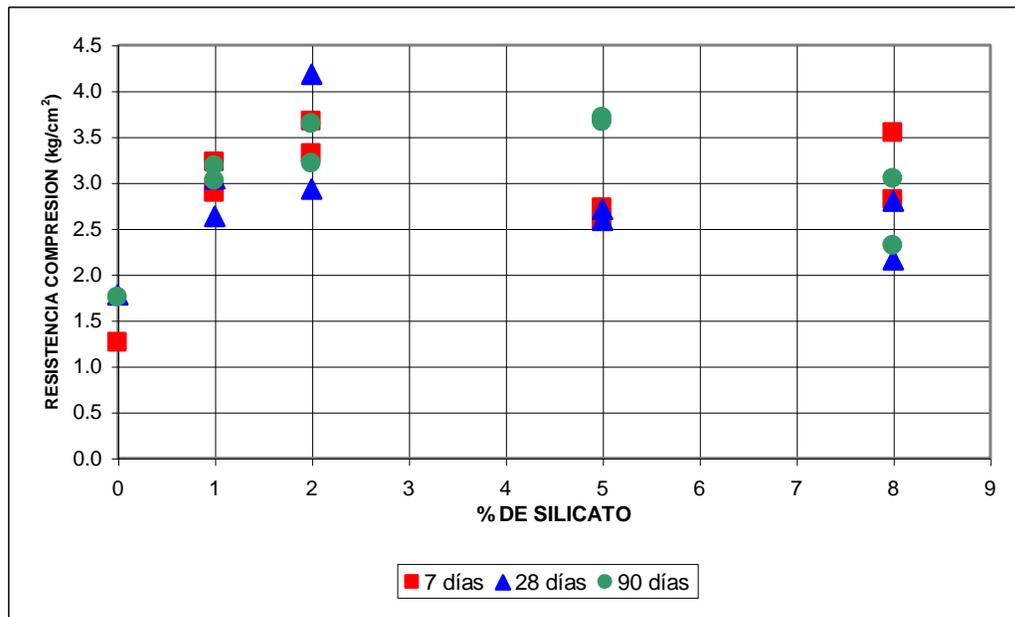
MHD: La muestra de humedad se dañó.

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 77 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 77. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada. Suelo 4



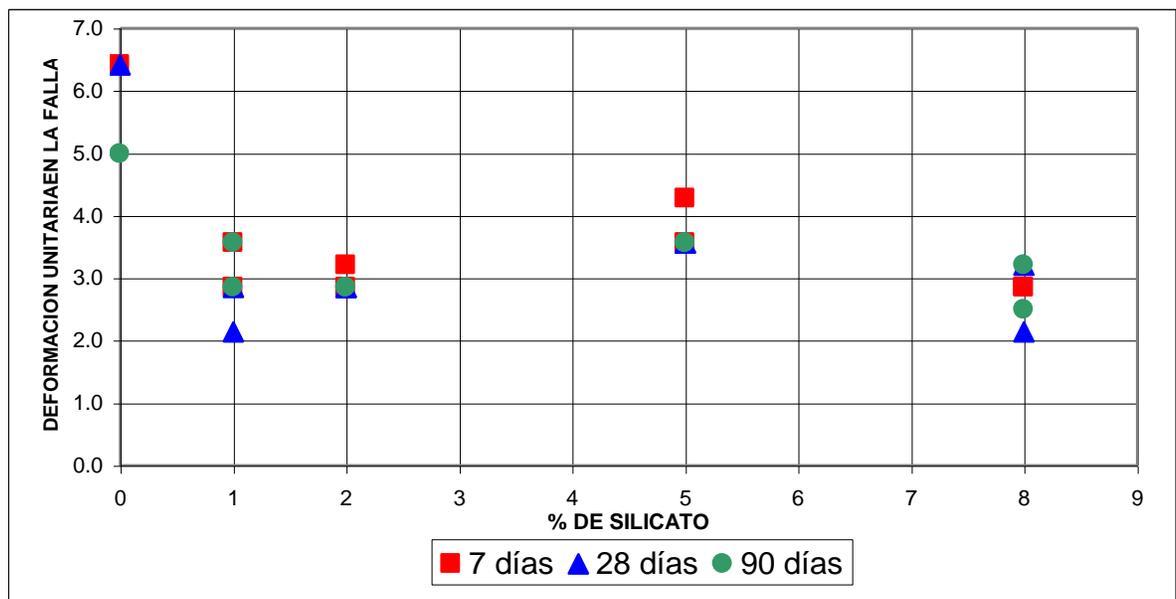
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de silicato del 2% o menos se presenta un incremento de la resistencia en la medida que aumenta la cantidad de silicato.
- ✓ Para porcentajes de silicato mayores del 2% la resistencia del suelo disminuye en la medida que se incrementa la cantidad de silicato con respecto a la resistencia obtenida con el 2% de silicato, pero los resultados son mayores a las resistencias dadas por el suelo sin estabilizar.
- ✓ No se observa un efecto claro del periodo de maduración en la resistencia del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 78 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 78. Efecto del porcentaje silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla. Suelo 4



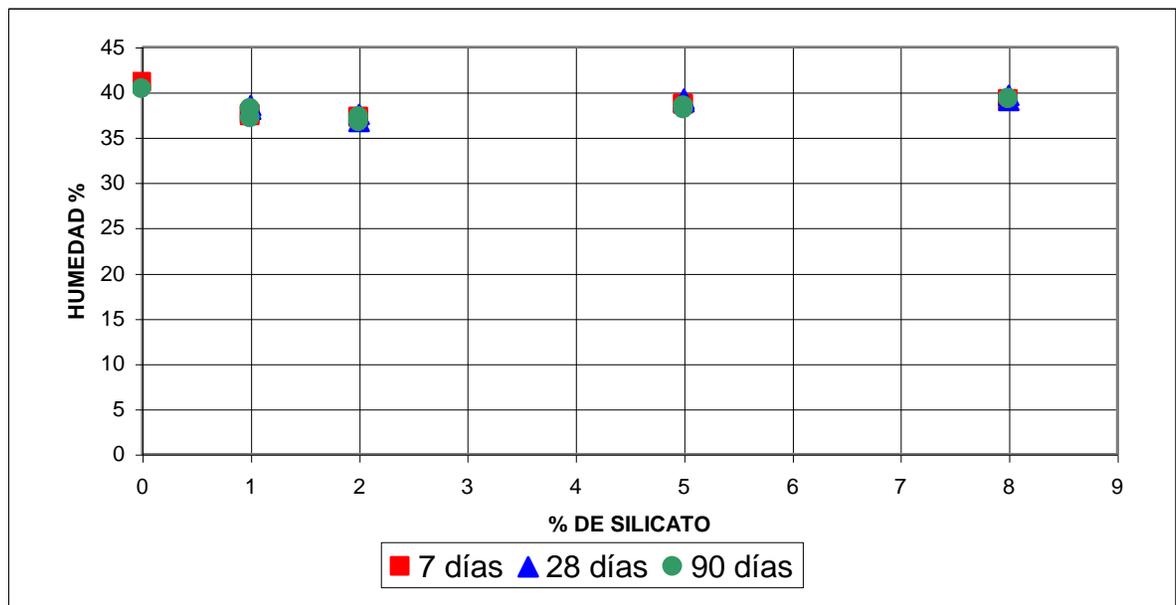
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato de calcio provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ La variación del porcentaje de silicato no genera cambios significativos en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ No se observa un efecto claro del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad**

En la ilustración 79 se muestra el efecto del silicato de calcio en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 79. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la variación de la humedad. Suelo 4



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Con la adición de silicato, el suelo pierde entre 2 y 4% de la humedad del suelo.
- ✓ La humedad del suelo aumenta en la medida que se incrementa la cantidad de silicato adicionada.
- ✓ El periodo de maduración no influye en la variación del contenido de humedad del suelo.

3.5. ANALISIS DEL EFECTO DEL BORAX EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

3.5.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del bórax en el comportamiento físico–mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Se elaboraron ciento ocho (108) briquetas harvard miniatura con mezclas de los suelos con la humedad óptima y porcentajes de Bórax del 0.5%, 1%, 2% y 4%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron las muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la biqueta.

3.5.2. Resultados

✓ Suelo 1

En la tabla 29 se presentan los resultados del análisis del efecto del Bórax en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 29. Efecto de la adición del Bórax. Suelo 1

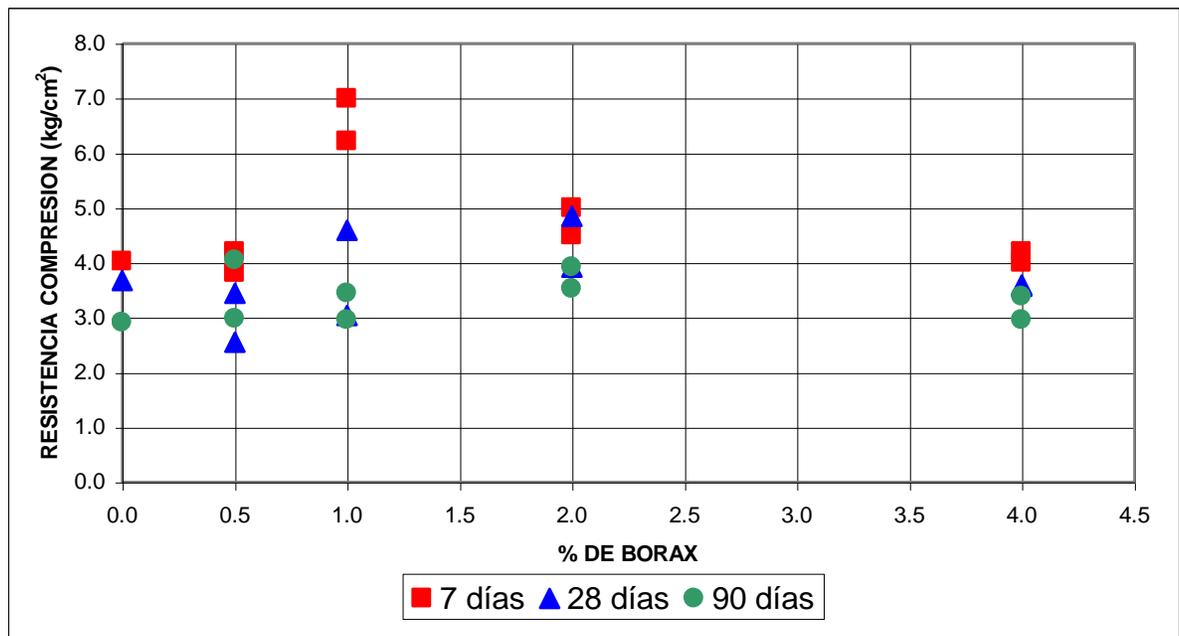
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
0,5% de Bórax	4.20	3.44	4.05	3.56	3.56	2.85	45.55	45.57	44.33
0,5% de Bórax	3.81	2.55	2.98	3.56	2.85	2.14	42.55	45.55	44.48
1% de Bórax	6.21	4.59	3.44	6.41	5.70	4.99	43.72	46.52	47.52
1% de Bórax	6.99	3.04	2.96	6.41	6.41	4.27	43.89	47.68	48.25
2% de Bórax	5.00	4.85	3.92	4.99	4.99	4.27	43.32	47.03	47.04
2% de Bórax	4.50	3.92	3.52	3.56	4.27	3.21	43.23	47.00	46.22
4% de Bórax	4.00	3.57	2.96	4.99	4.27	4.27	47.49	49.15	44.53
4% de Bórax	4.20	3.59	3.39	5.70	4.99	4.99	47.56	49.15	46.35

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje del bórax en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 80 se muestra el efecto del bórax en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 80. Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 1



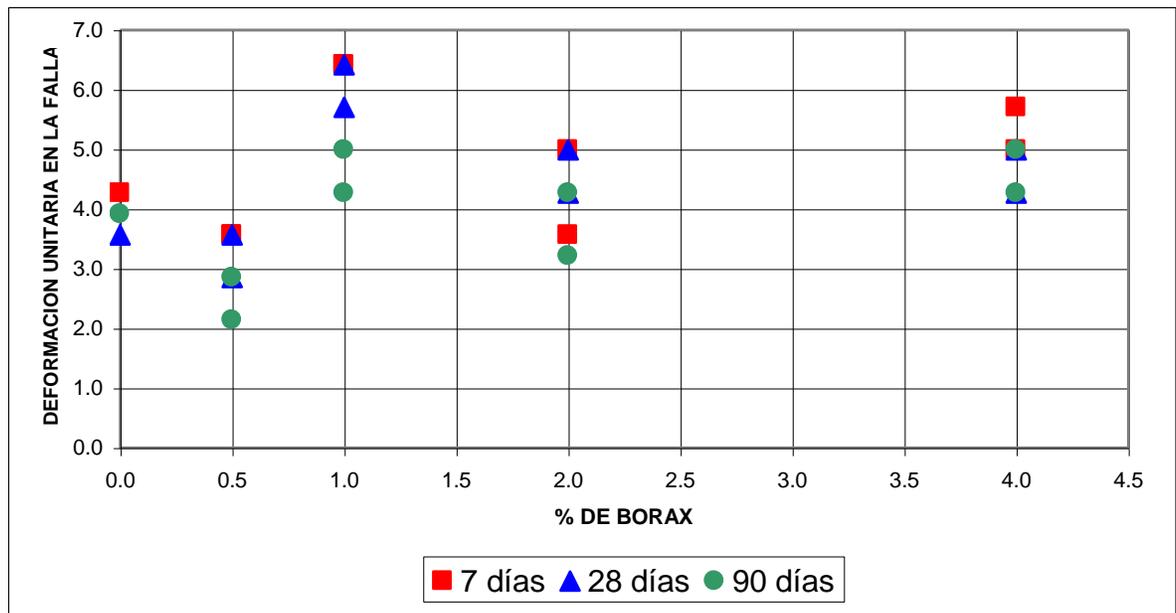
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de bórax del 2% o menores la resistencia aumenta con el aumento de la cantidad de bórax.
- ✓ Para cantidades de bórax superiores al 2% la resistencia disminuye en la medida que aumenta la cantidad de bórax.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la resistencia del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla.**

En la ilustración 81 se muestra el efecto del bórax en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 81. Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla. Suelo 1



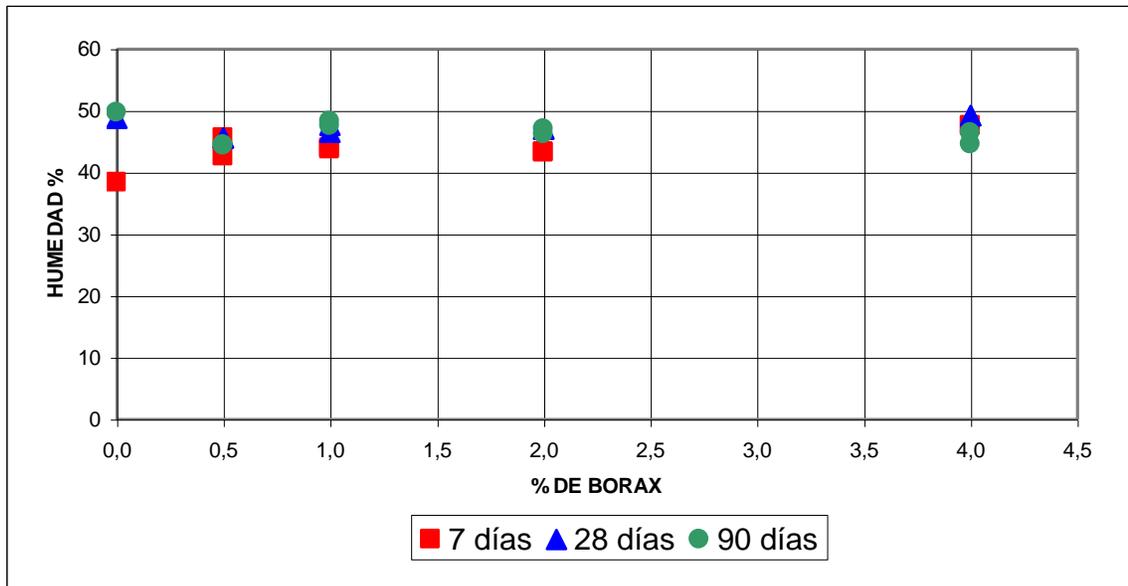
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que se incrementa la cantidad de bórax.
- ✓ La deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que aumenta el periodo de maduración.
- ✓ A los 90 días se presentan los menores valores de deformación unitaria en la falla y resistencia.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad**

En la ilustración 82 se muestra el efecto del bórax en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 82. Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad Suelo 1



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La humedad del suelo aumenta con el incremento del porcentaje de bórax.
 - ✓ El periodo de maduración no tiene efectos sobre la humedad del suelo.
- ✓ **Suelo 2**
En la tabla 30 se presentan los resultados del análisis del efecto del bórax en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 30. Efecto de la adición del bórax. Suelo 2

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,85	33,09	30,30
0,5% de Bórax	2.46	2.82	MD	7.12	5.70	MD	25.30	24.31	MD
0,5% de Bórax	1.96	2.26	2.79	5.70	3.56	3.56	25.63	25.06	25.42
1% de Bórax	1.37	1.86	2.34	4.99	4.99	8.19	24.56	25.11	25.30
1% de Bórax	1.61	1.91	2.85	9.26	6.41	6.77	24.60	25.13	25.52
2% de Bórax	1.57	1.77	1.91	4.99	6.41	5.70	24.91	24.95	25.36
2% de Bórax	1.63	2.27	2.05	7.12	8.55	7.12	25.20	25.46	25.37
4% de Bórax	2.62	2.01	2.23	4.99	7.12	7.12	26.44	26.98	27.40
4% de Bórax	2.01	2.10	2.37	7.84	7.12	7.12	27.47	27.24	27.20

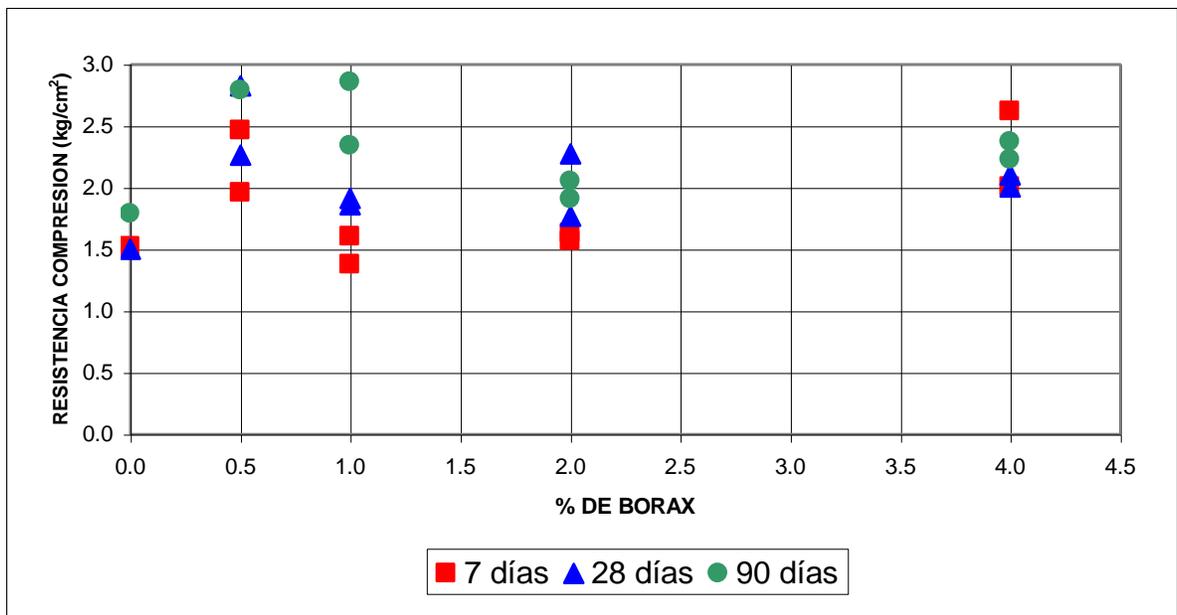
MD: Muestra dañada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 83 se muestra el efecto del bórax en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 83. Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 2



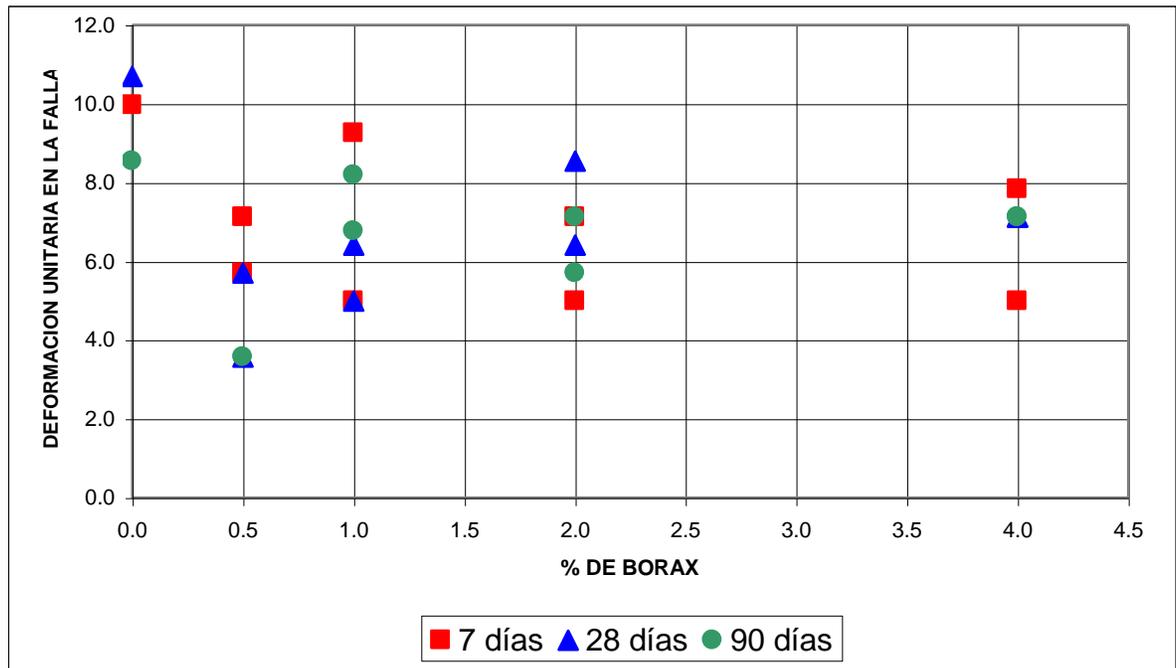
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para un porcentaje de bórax del 2% o menos la resistencia disminuye en la medida que aumenta la cantidad de bórax.
- ✓ Para un porcentaje de bórax mayor al 2% la resistencia aumenta en la medida que aumenta la cantidad de bórax.
- ✓ La resistencia del suelo aumenta en la medida que aumenta el periodo de maduración.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla.**

En la ilustración 84 se muestra el efecto del bórax en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 84. Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla. Suelo 2



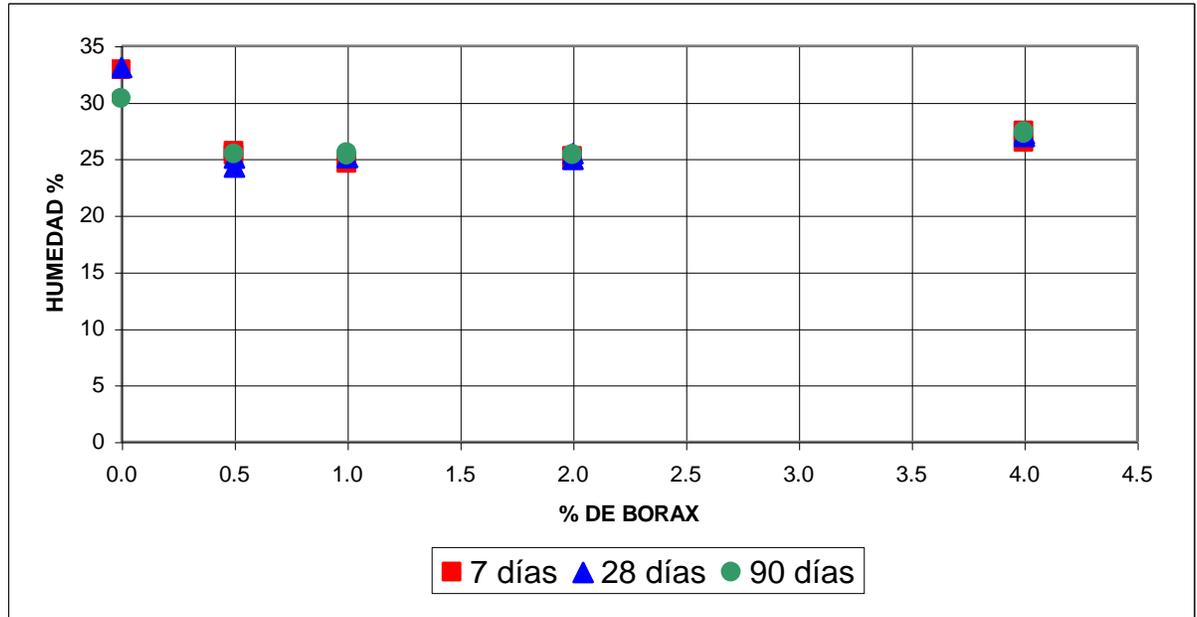
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que se incrementa el porcentaje de bórax, pero, la deformación presentada en las muestras con bórax siempre es menor que la del suelo solo.
- ✓ Para porcentajes de bórax mayores del 2% el incremento de Bórax no representa incrementos significativos en la deformación unitaria en la falla.
- ✓ No se observa un efecto claro del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad**

En la ilustración 85 se muestra el efecto del bórax en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 85. Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad. Suelo 2



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La humedad aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de bórax, pero no con respecto a la muestra que no tiene bórax. En general el uso de bórax disminuye la humedad un poco, con relación al suelo que no tiene.

✓ **Suelo 3**

En la tabla 31 se presentan los resultados del análisis del efecto del bórax en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 31. Efecto de la adición del bórax. Suelo 3

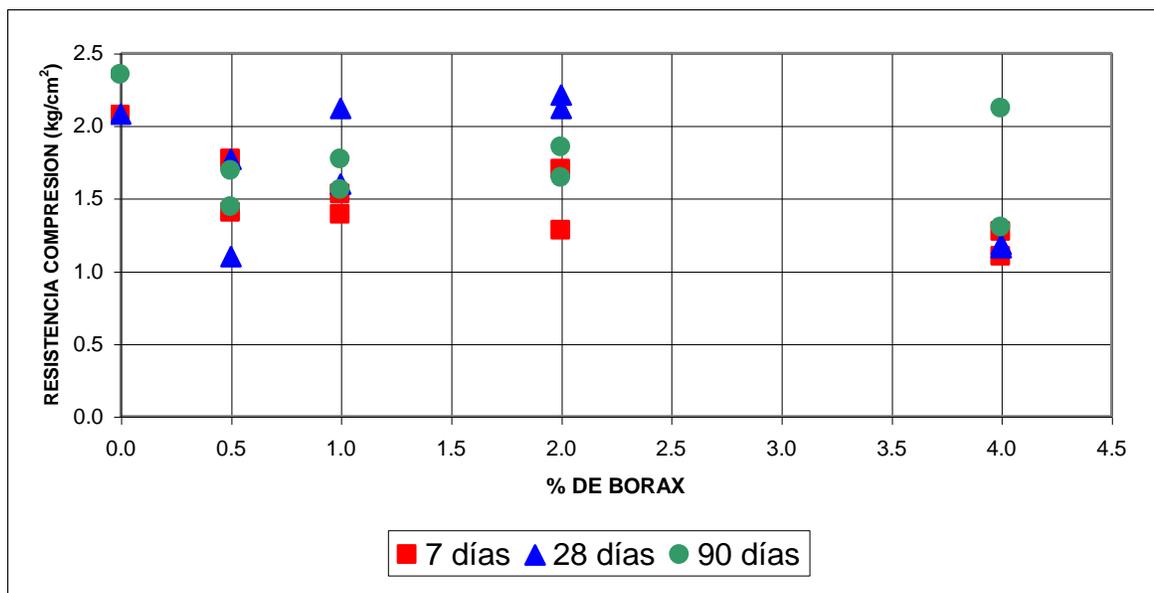
Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	2,07	2,08	2,35	2,85	2,14	1,42	30,49	37,24	32,54
0,5% de Bórax	1.77	1.10	1.44	2.85	3.92	3.56	30.62	30.33	29.17
0,5% de Bórax	1.40	1.77	1.69	4.27	5.34	3.56	29.51	28.11	28.69
1% de Bórax	1.39	1.60	1.56	3.56	3.21	3.56	34.40	33.16	32.40
1% de Bórax	1.53	2.12	1.77	4.27	3.56	3.56	34.11	33.00	32.46
2% de Bórax	1.70	2.21	1.85	2.85	3.56	3.56	28.98	28.75	29.84
2% de Bórax	1.28	2.12	1.64	2.14	3.56	3.56	30.04	28.74	28.46
4% de Bórax	1.27	1.16	1.30	2.85	4.27	4.27	30.75	31.30	30.44
4% de Bórax	1.10	1.18	2.12	3.56	3.92	4.27	36.04	29.53	32.63

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 86 se muestra el efecto del bórax en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado

Ilustración 86. Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 3



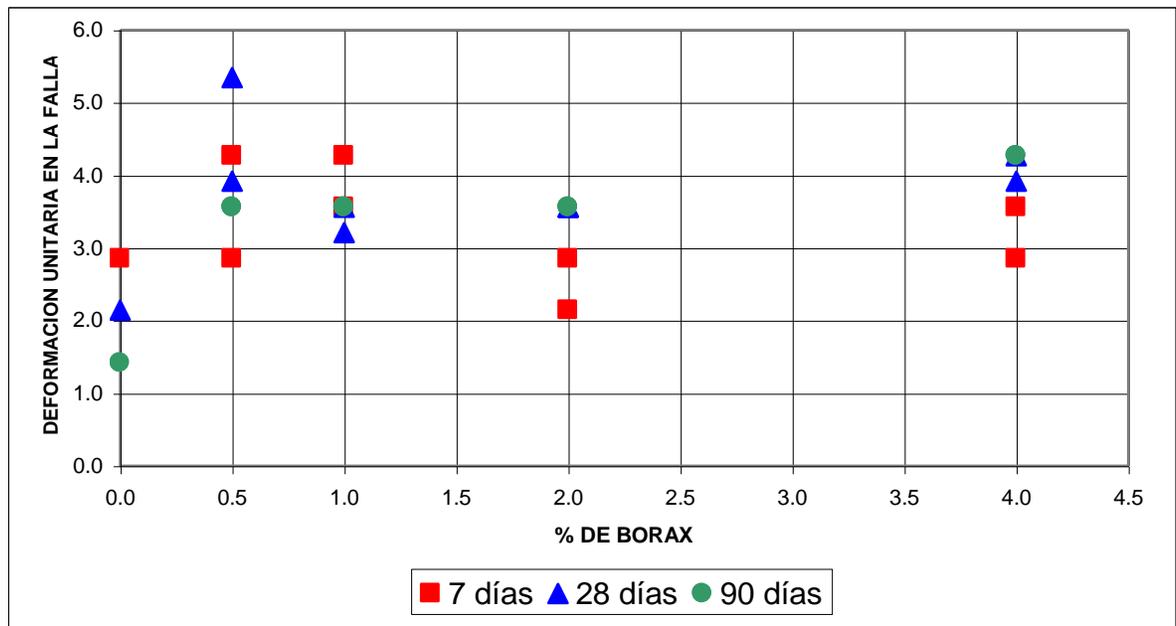
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La resistencia del suelo sin tratar es mejor que la del suelo con bórax, pero a medida que se va incrementando el porcentaje de bórax, la resistencia va aumentando hasta el 2%.
- ✓ Para porcentajes de bórax superiores al 2% se observa que la resistencia vuelve a disminuir en la medida que aumenta la cantidad de Bórax.
- ✓ No se observa un efecto claro del periodo de maduración en la resistencia del suelo.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 87 se muestra el efecto del bórax en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 87. Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla. Suelo 3



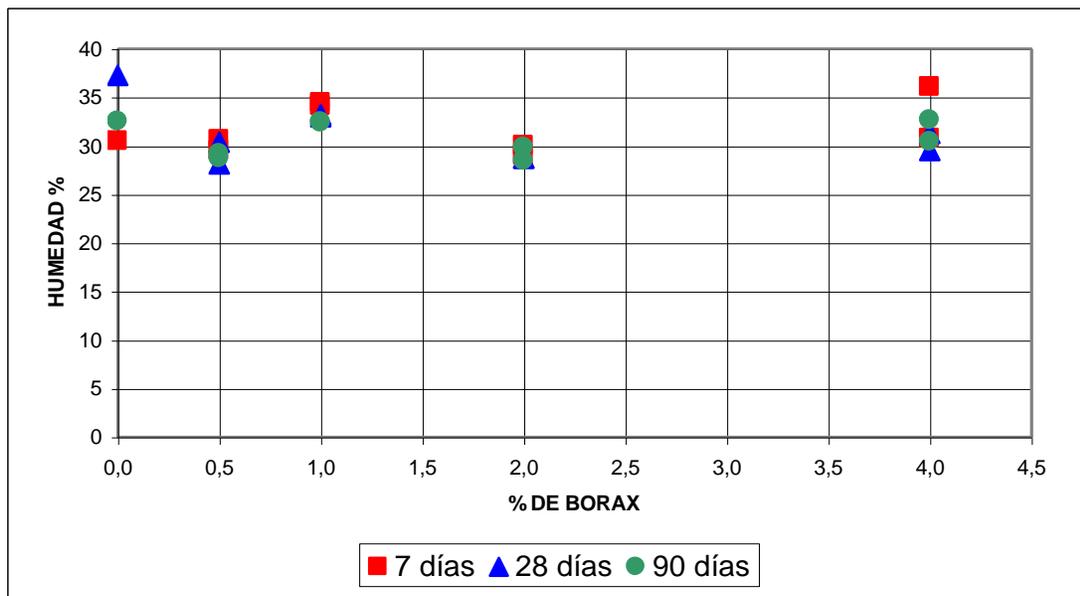
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de bórax mayores al 2%, en la medida que se incrementa el porcentaje de bórax se aumenta la deformación unitaria en la falla de la muestra, siendo menores las deformaciones del suelo sin bórax.
- ✓ Para porcentajes de bórax del 2% o menos, no se observa un efecto del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla de la muestra.
- ✓ Para porcentajes de bórax mayores al 2%, en la medida que se incrementa el periodo de maduración se aumenta la deformación unitaria en la falla de la muestra.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad**

En la ilustración 88 se muestra el efecto del bórax en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 88. Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad. Suelo 3



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para los diferentes periodos de maduración no se observan efectos significativos del porcentaje de bórax en la variación de la humedad.

✓ **Suelo 4**

En la tabla 32 se presentan los resultados del análisis del efecto del bórax en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 32 Efecto de la adición del bórax. Suelo 4

Curado (días)	Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar	1,26	1,78	1,75	6,41	6,41	4,99	41,05	MHD	40,33
0,5% de Bórax	2.02	1.88	1.99	8.55	9.26	8.55	43.42	43.26	43.59
0,5% de Bórax	2.15	1.73	1.83	7.12	8.19	8.19	43.72	43.91	43.83
1% de Bórax	2.82	1.45	2.97	7.84	9.26	9.97	41.29	41.37	41.15
1% de Bórax	2.40	1.57	1.98	7.84	9.62	8.55	41.31	40.90	41.68
2% de Bórax	2.90	1.60	2.70	9.26	8.55	9.97	37.93	37.63	37.36
2% de Bórax	2.36	1.37	3.42	9.21	4.99	10.33	38.13	38.14	33.33
4% de Bórax	4.10	3.16	3.54	4.27	4.27	4.99	35.95	35.04	35.80
4% de Bórax	3.20	2.54	3.83	3.56	3.56	4.99	36.36	35.82	35.71

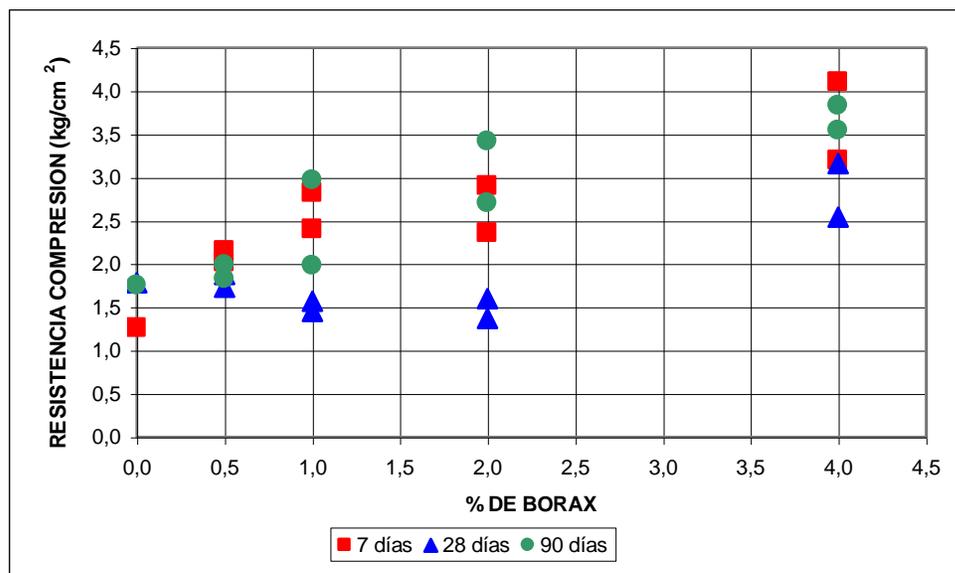
MHD: La muestra de humedad se dañó

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 89 se muestra el efecto del bórax en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 89. Efecto del porcentaje de bórax en la resistencia a la compresión inconfiada. Suelo 4



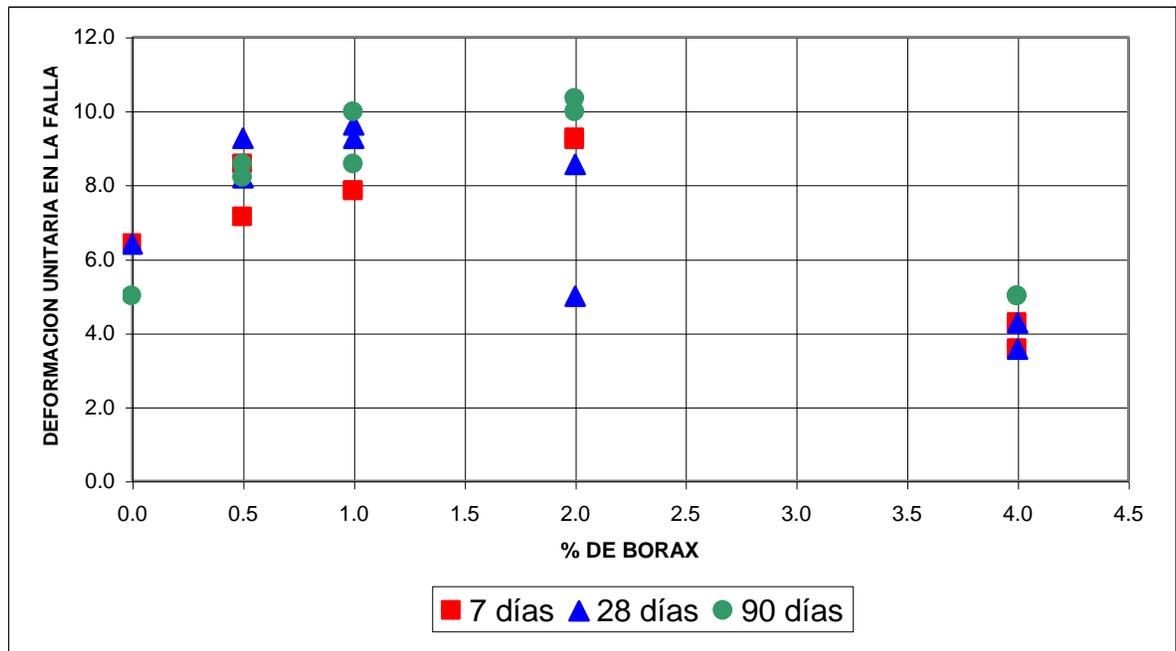
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se aumenta el porcentaje de bórax se incrementa la resistencia del suelo.
- ✓ No se observa claramente el efecto del periodo de maduración en la resistencia del suelo, aunque a los 28 días se presentan las menores resistencias.
- ✓ Este suelo reacciona favorablemente a la adición de bórax.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 90 se muestra el efecto del bórax en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 90. Efecto del porcentaje de bórax en la deformación unitaria en la falla. Suelo 4



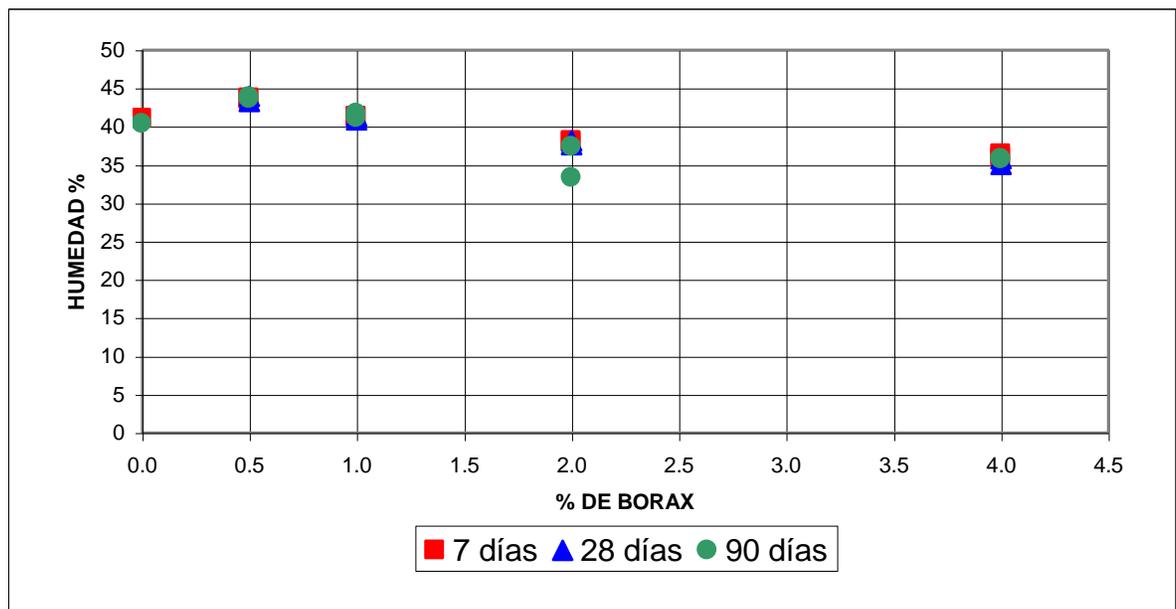
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de bórax del 2% o menos, en la medida que se incrementa el porcentaje de Bórax se aumenta la deformación unitaria en la falla de la muestra.
- ✓ Para porcentajes de bórax mayores al 2%, en la medida que se incrementa el porcentaje de bórax se disminuye la deformación unitaria en la falla de la muestra.
- ✓ En la medida que se incrementa el periodo de maduración se aumenta la deformación unitaria en la falla de la muestra.

➤ **Efecto del porcentaje de bórax en la variación de la humedad**

En la ilustración 91 se muestra el efecto del bórax en la variación de la humedad para diferentes periodos de curado.

Ilustración 91. Efecto del porcentaje del bórax en la variación de la humedad Suelo 4



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La humedad del suelo disminuye con el incremento del porcentaje de bórax a partir del 1% de contenido de bórax, para contenidos del 0.5% y 1% la húmeda aumenta un poco.
- ✓ El periodo de maduración no tiene efectos sobre la humedad del suelo.

4. ANALISIS DEL EFECTO DE LOS ESTABILIZANTES EN EL SUELO-CEMENTO

4.1. INTRODUCCION

En este capítulo se pretende estudiar si la adición de un químico o un polímero permite mejorar la propiedades físico-mecánicas de los suelos estabilizados con cemento.

Teniendo en cuenta que la utilización de todos los suelos, para esta etapa de la investigación, requeriría de la realización de una gran cantidad de ensayos que por las circunstancias de tiempo y recursos no es posible realizar,. Adicionalmente, para el cumplimiento de los objetivos planteados es suficiente el estudio de dos tipos diferentes de suelos que presenten un buen comportamiento frente a la estabilización con cemento.

Del capítulo anterior se puede observar que los suelos que en términos generales presentan un mejor comportamiento al ser mejorados con cemento son los suelos 2 y 4.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente a cerca de la necesidad de limitar el numero de ensayos debido a la escasez de tiempo y recursos, se definieron los porcentajes de cemento con que mejor se comportan los suelos a fin de adicionarle los otros estabilizantes para observar los efectos que estos presentan sobre los suelos estabilizados con cemento. Con base en lo obtenido en el capitulo anterior se puede observar que cantidades del 2 y 4% de cemento dan buenos de resultados en el mejoramiento de los suelos razón por la cual se usarán para el estudio del presente capítulo.

4.2. ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO

4.2.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto de la dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cemento se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 y 4, porcentajes de cemento del 2 y 4% y porcentajes de dicloruro de sodio del 1%, 2%, 5% y 8%.

- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briketa.

4.2.2. Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cemento

En la tabla 33 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cemento.

Tabla 33. Efecto de la adición de dicloruro de sodio al suelo 2 con 2% de cemento

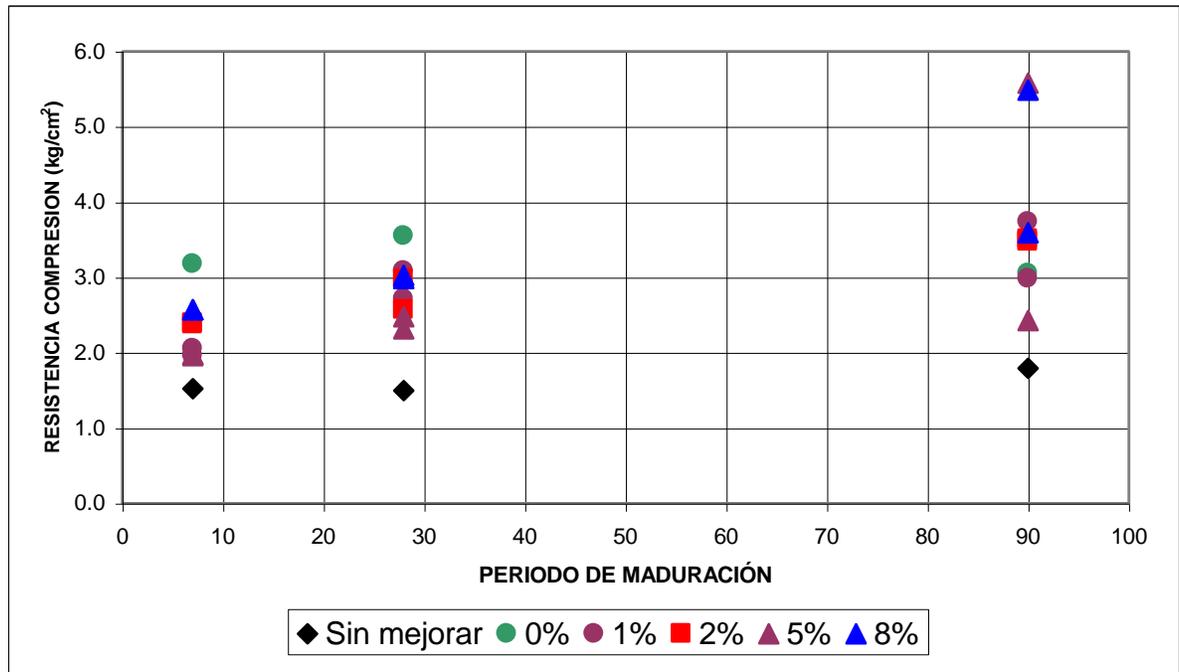
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin Tratar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
2% de cemento	0% de Dicloruro	3,18	3,55	3,05	4,27	3,56	2,85	31,0	31,9	30,6
	1% de Dicloruro	1,96	2,71	2,98	5,70	5,70	5,34	40,6	40,7	39,2
	1% de Dicloruro	2,05	3,09	3,74	5,70	6,41	5,70	40,8	40,2	38,8
	2% de Dicloruro	2,39	2,57	3,48	5,70	4,99	4,99	40,5	40,3	39,3
	2% de Dicloruro	2,37	2,97	3,51	5,70	4,99	4,99	40,3	40,1	38,3
	5% de Dicloruro	1,97	2,32	5,58	7,12	8,55	7,12	40,7	38,2	37,3
	5% de Dicloruro	1,96	2,47	2,43	9,97	8,55	8,55	40,4	40,4	39,9
	8% de Dicloruro	2,57	3,03	5,49	5,70	4,27	5,70	38,3	38,2	36,1
	8% de Dicloruro	2,57	2,98	3,59	5,70	5,70	5,70	38,3	38,3	37,8

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 92 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo - cemento para diferentes periodos de curado.

Ilustración 92. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada del suelo 2 con 2% de cemento



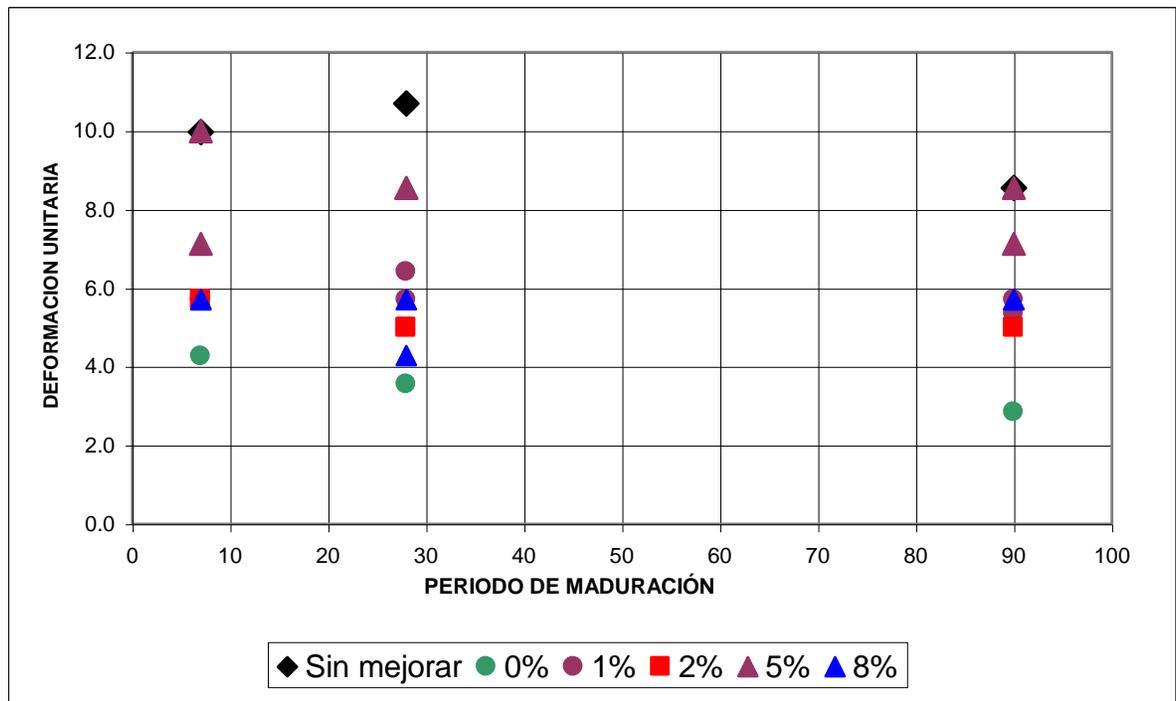
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro de sodio permite que la resistencia del suelo-cemento continúe creciendo después de los 28 días de curado.
- ✓ Para un porcentaje de dicloruro de sodio superior al 1% se obtienen aumentos de resistencia del suelo-cemento después de los 90 días de curado.
- ✓ Para cantidades superiores al 5% el incremento de la cantidad de dicloruro no se observa incremento de la resistencia a los 90 días de curado.
- ✓ Para periodos de curado de 28 días o menos la resistencia del suelo-cemento se disminuye por la adición de dicloruro.

➤ **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 93 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 93. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro de sodio incrementa la deformación unitaria en la falla del suelo-cemento.
 - ✓ Para una adición del 5% de dicloruro de sodio se pueden alcanzar los valores de deformación del suelo natural.
 - ✓ Se observa que las menores deformaciones se presentan en el suelo-cemento sin adición de dicloruro.
- ✓ **Suelo 2 con 4% de cemento**

En la tabla 34 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico de este suelo.

Tabla 34. Efecto de la adición del dicloruro de sodio al suelo 2 con 4% de cemento

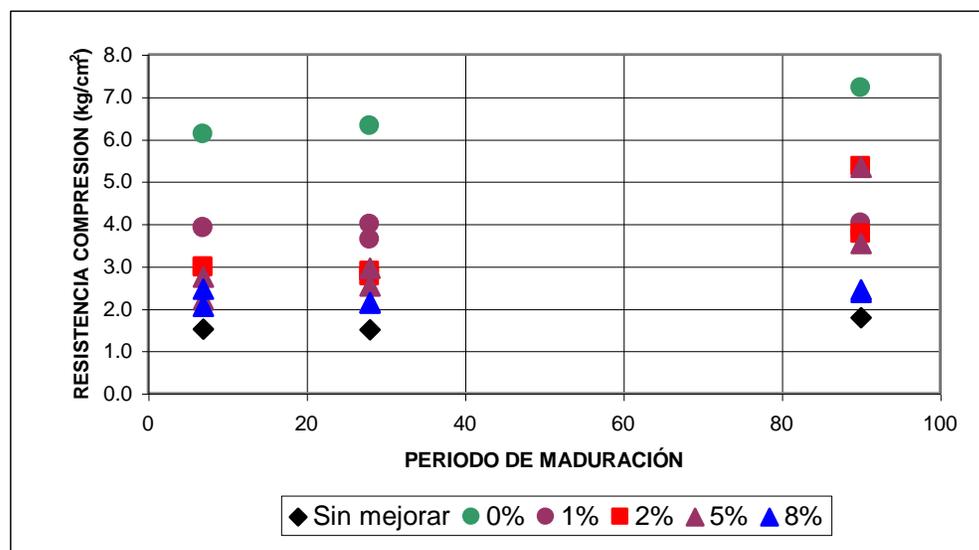
	Curado (días)	Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Sin tratar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
4 % de Cemento	0% de dicloruro	6,11	6,30	7,20	3,21	2,85	2,14	35,8	31,7	30,0
	1% de dicloruro	3,91	3,63	3,77	4,27	4,27	3,21	39,6	39,7	39,2
	1% de dicloruro	3,89	3,99	4,02	4,99	4,27	4,27	39,7	40,0	39,1
	2% de dicloruro	2,98	2,76	3,77	5,70	4,99	4,99	40,6	40,6	39,7
	2% de dicloruro	2,97	2,88	5,34	5,70	4,27	4,27	40,5	40,6	37,9
	5% de dicloruro	2,74	2,95	5,33	5,70	5,70	4,99	40,4	40,2	35,6
	5% de dicloruro	2,20	2,53	3,53	6,41	6,41	5,70	41,1	40,5	38,3
	8% de dicloruro	2,05	2,13	2,39	9,26	7,12	7,12	41,7	40,6	40,6
	8% de dicloruro	2,46	2,15	2,44	8,55	7,84	4,99	41,5	41,0	40,4

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 94 se muestra el efecto de la dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 94. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 4% de cemento

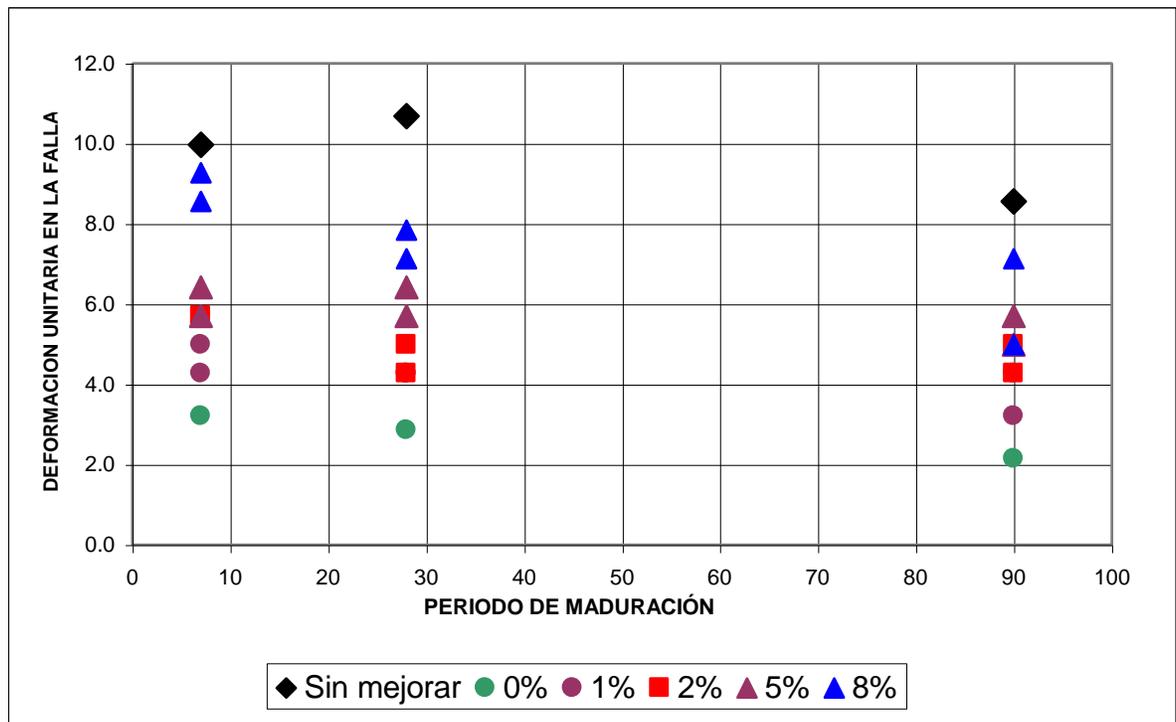


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro provoca una disminución considerable en la resistencia del suelo–cemento, para este contenido de cemento (4%).
 - ✓ Entre mayor es la cantidad de dicloruro adicionada mayor es la disminución de la resistencia del suelo-cemento.
 - ✓ No se observan cambios de la resistencia con respecto al tiempo de maduración.
- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 95 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 95. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro permite incrementar la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento.
- ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de dicloruro aumenta la deformación unitaria en la falla.
- ✓ A los 90 días la deformación unitaria en la falla disminuye un poco.

✓ **Suelo 4 con 2% de cemento**

En la tabla 35 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 35. Efecto de la adición del dicloruro de sodio al suelo 4 con 2% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin tratar	4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
2% de cemento	0% de Dicloruro	4,56	3,26	4,38	4,27	2,85	3,21	ND	38,7	39,1
	1% de Dicloruro	3,00	3,58	3,98	7,12	6,41	7,84	41,4	41,4	40,7
	1% de Dicloruro	2,95	3,25	4,03	7,84	7,12	7,12	41,1	41,8	42,2
	2% de Dicloruro	4,36	4,77	5,12	4,99	3,56	3,56	38,9	38,2	37,9
	2% de Dicloruro	3,72	3,94	5,34	3,56	3,56	4,27	38,8	38,5	37,6
	5% de Dicloruro	3,91	4,90	6,48	4,27	4,99	4,27	38,3	37,8	37,8
	5% de Dicloruro	4,32	4,62	4,40	4,27	4,99	4,27	38,0	38,1	37,9
	8% de Dicloruro	4,28	4,25	4,79	4,27	3,56	4,27	39,4	37,2	36,8
	8% de Dicloruro	3,62	4,43	3,79	4,27	3,56	3,56	37,7	37,1	36,9

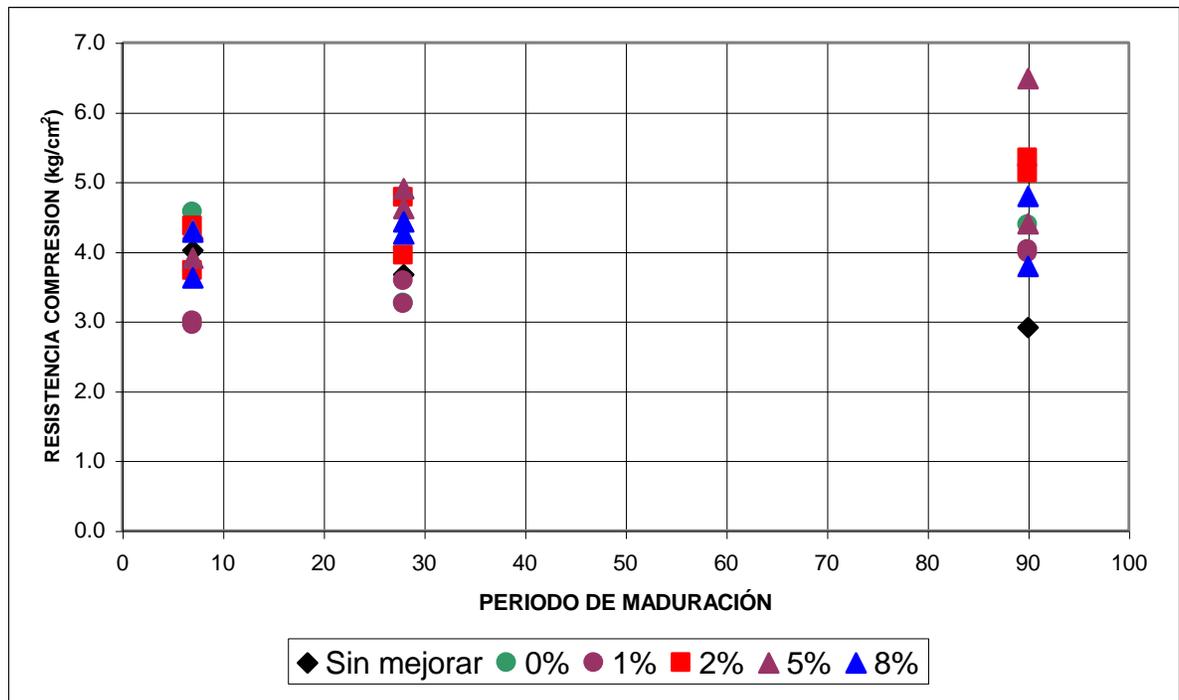
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 96 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 96. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 2% de cemento

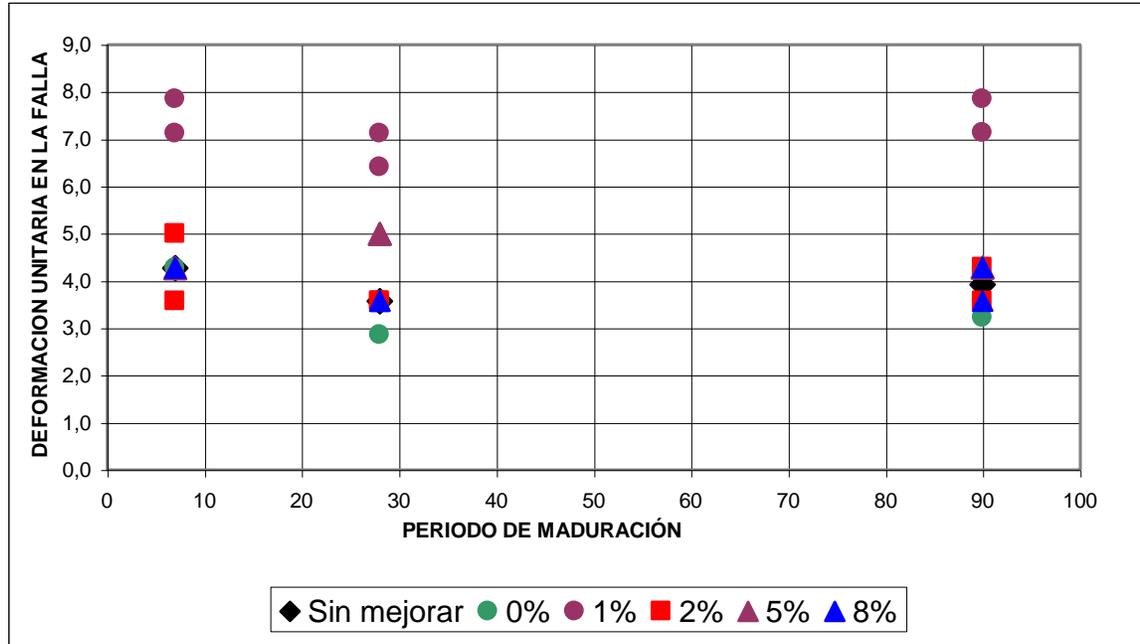


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de cantidades de dicloruro del 5% o menores mejoran el efecto del cemento sobre el suelo, para este porcentaje de cemento.
 - ✓ La adición del dicloruro permite que la resistencia del suelo cemento continúe creciendo después de los 28 días.
 - ✓ La adición de cantidades de dicloruro del 2 al 5% permiten incrementar la resistencia del suelo–cemento a los 90 días.
 - ✓ El incremento de la cantidad de dicloruro de sodio después del 5% disminuye la resistencia del suelo cemento.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 97 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 97. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de un 1% de dicloruro de sodio permite incrementar la deformación unitaria del suelo–cemento de forma considerable.
- ✓ Para cantidades de dicloruro superiores al 1% no se observa incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento.

✓ **Suelo 4 con 4% de cemento**

En la tabla 36 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico de este suelo.

Tabla 36. Efecto de la adición del dicloruro de sodio al suelo 4 con 4% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin tratar		4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
4% de cemento	0% de dicloruro	5,62	4,78	6,20	2,85	1,78	2,85	ND	37,9	39,1
	1% de dicloruro	5,22	5,02	4,69	4,99	4,27	4,27	41,5	42,1	41,7
	1% de dicloruro	5,30	4,27	5,41	4,99	3,56	4,27	41,6	42,1	41,4
	2% de dicloruro	4,82	4,48	5,26	4,99	4,99	4,27	41,8	42,7	40,6
	2% de dicloruro	5,13	4,74	4,35	5,70	4,27	3,56	41,2	41,7	39,8
	5% de dicloruro	5,14	4,97	5,76	4,63	3,56	3,56	40,0	39,9	39,4
	5% de dicloruro	5,06	5,31	5,28	4,27	4,27	4,27	40,4	40,5	39,7
	8% de dicloruro	4,58	3,96	4,71	4,27	2,14	2,85	38,1	38,9	37,6
	8% de dicloruro	4,86	3,45	4,56	3,21	2,14	2,85	37,9	38,9	38,2

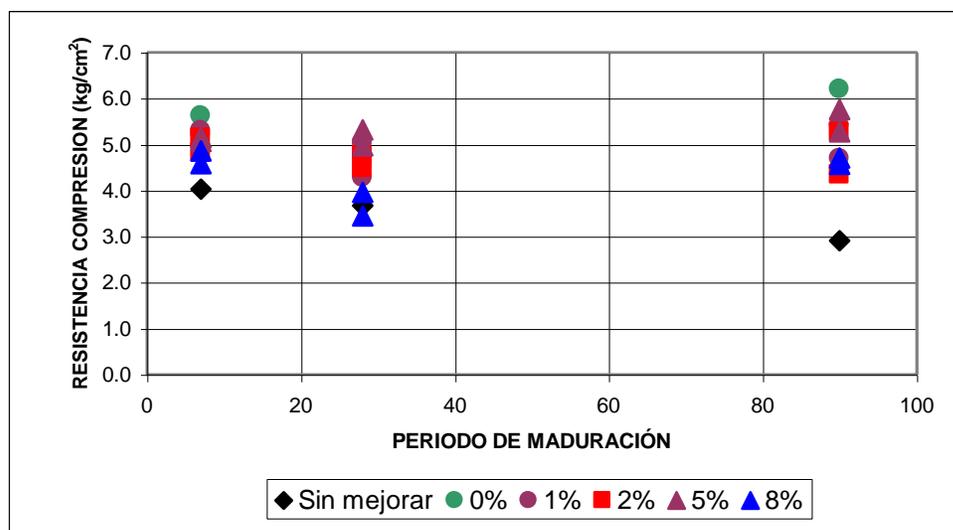
ND No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 98 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 98. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 4% de cemento

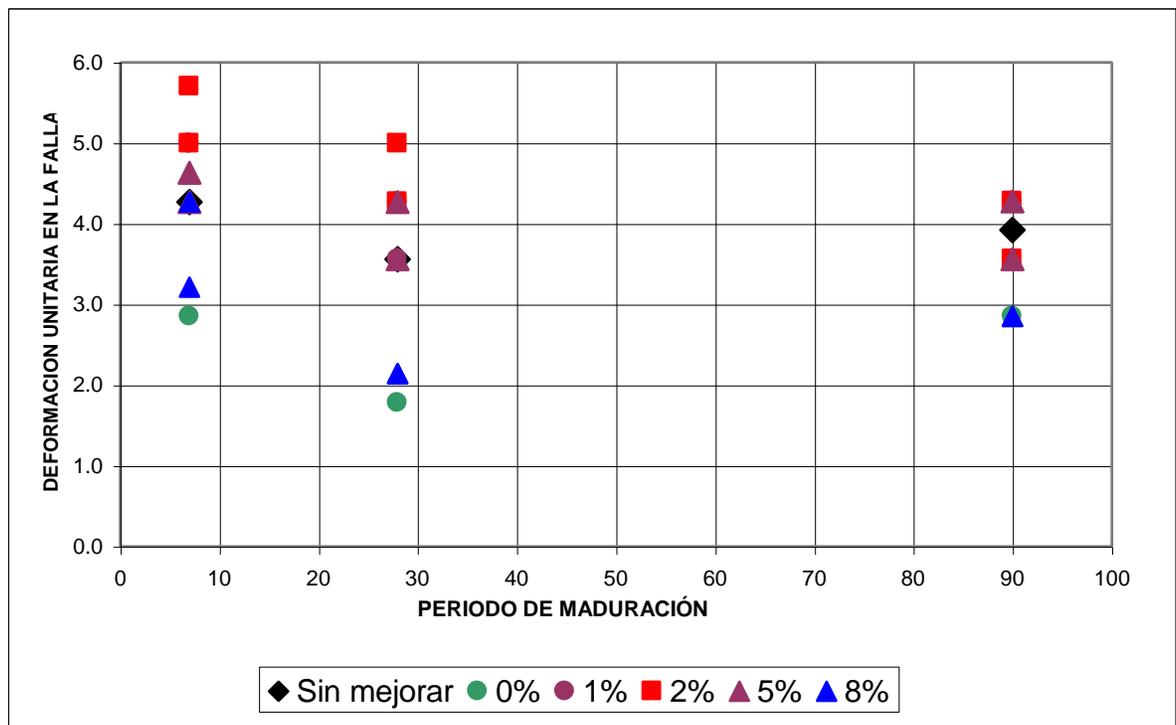


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro muestra una disminución en la resistencia del suelo – cemento.
 - ✓ Entre mayor es la cantidad de dicloruro adicionada mayor es la disminución en la resistencia del suelo–cemento.
 - ✓ El efecto del dicloruro sobre el suelo–cemento se observa con mayor claridad para un periodo de maduración de 90 días.
- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 99 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 99. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro de sodio produce un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Hasta cantidades del 2% de dicloruro de sodio, la deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que se incrementa el dicloruro.
- ✓ Para cantidades de dicloruro superiores al 2% la deformación unitaria en la falla empieza a disminuir en la medida que se incrementa la cantidad de dicloruro.
- ✓ Para un contenido del 8% de dicloruro de sodio la deformación unitaria en la falla es similar a la del suelo-cemento sin dicloruro.
- ✓ Para un periodo de maduración de 90 días el efecto del dicloruro de sodio disminuye.
- ✓ Se observa que las menores deformaciones se presentan para el suelo-cemento solo y con 8% de dicloruro.

4.3. ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS-CEMENTO

4.3.1 Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cemento se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas del harvard miniatura con mezclas de suelos 2 y 4, porcentajes de cemento del 2, 3 y 4% y porcentajes de silicato de calcio del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la Deformación unitaria en la falla de la briquea.

4.3.2 Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cemento

En la tabla 37 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico de este suelo.

Tabla 37. Efecto de la adición del silicato de calcio al suelo 2 con 2% de cemento

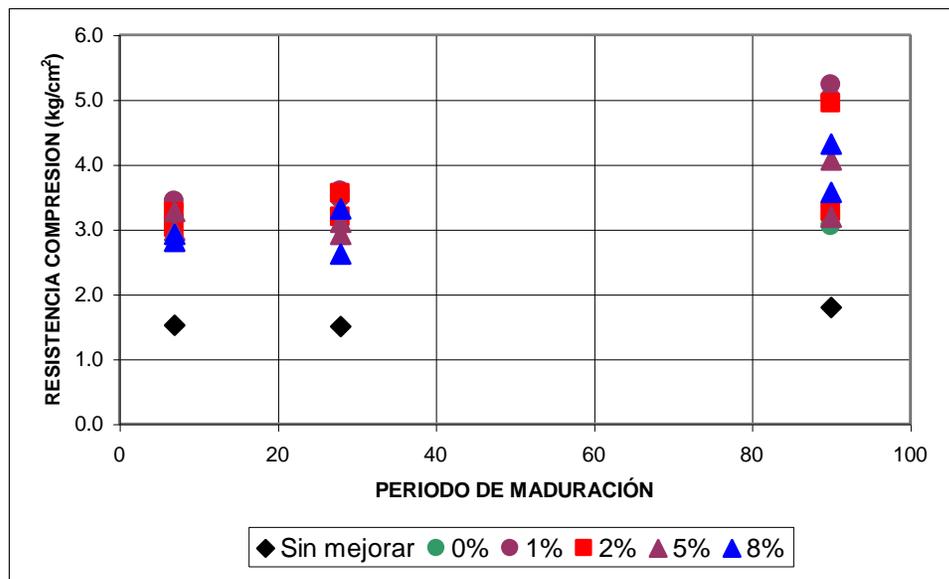
	Curado (días)	Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Sin mejorar	1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
2% de cemento	0% de silicato	3,18	3,55	3,05	4,27	3,56	2,85	31,0	31,9	30,6
	1% de silicato	3,33	3,47	5,22	3,56	2,85	4,10	32,0	31,4	29,6
	1% de silicato	3,43	3,59	5,02	3,56	2,85	3,21	32,0	31,1	29,1
	2% de silicato	3,26	3,19	3,27	2,85	2,85	2,49	30,6	30,6	30,3
	2% de silicato	3,02	3,55	4,94	2,85	2,85	2,85	31,2	30,4	27,8
	5% de silicato	3,28	2,93	3,19	3,21	2,85	2,85	32,1	32,2	31,2
	5% de silicato	2,98	3,11	4,07	3,21	2,85	3,21	32,6	32,4	30,9
	8% de silicato	2,81	2,61	4,31	2,85	2,14	2,49	31,5	31,7	31,0
	8% de silicato	2,92	3,32	3,57	2,49	2,49	2,49	31,4	30,5	30,6

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 100 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 100. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 2% de cemento

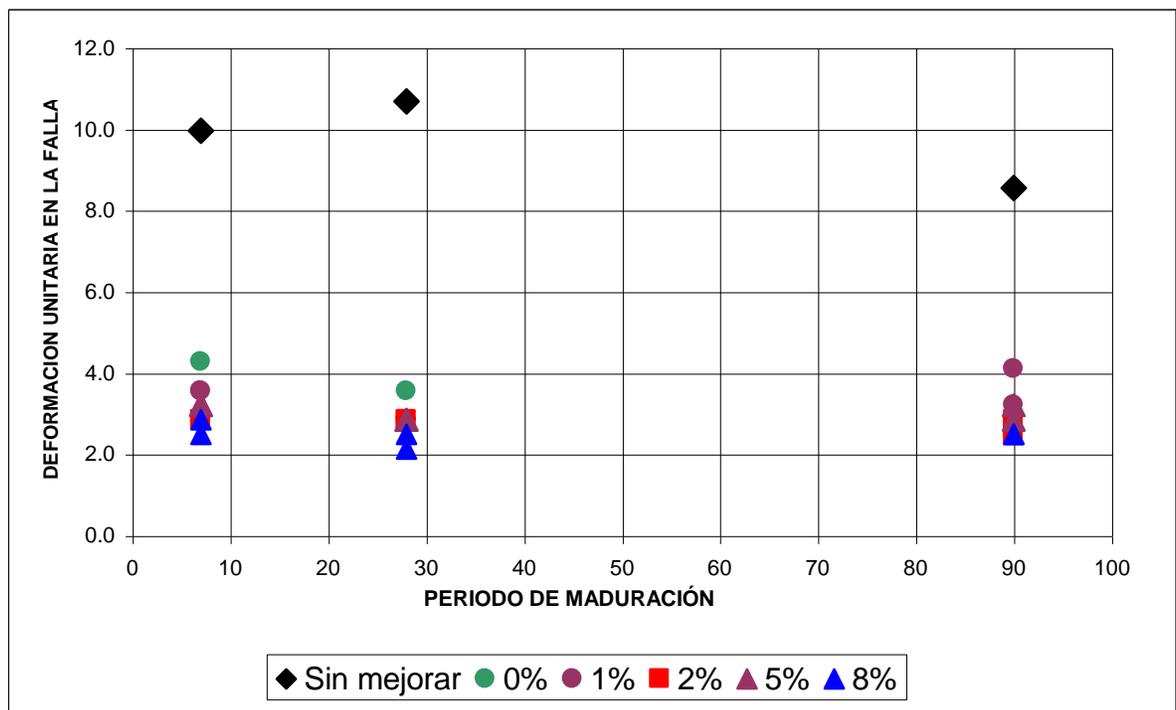


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ A los 90 días de curado la adición del silicato produce incrementos considerables en la resistencia del suelo – cemento.
 - ✓ Para periodos de curado de 28 días o menores no se observan efectos significativos del silicato en la resistencia del suelo.
 - ✓ Las mayores resistencias se presentan con un 1% de silicato para el periodo de curado de 90 días.
 - ✓ Para cantidades superiores al 1% de silicato la resistencia del suelo disminuye en la medida que se incrementa el contenido de silicato.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 101 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 101. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del silicato provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo con este contenido de cemento.
- ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de silicato disminuye la deformación unitaria en la falla.
- ✓ En la medida que se incrementa el periodo de curado el efecto del silicato sobre la deformación unitaria en la falla disminuye.

✓ **Suelo 2 con 3% de cemento**

En la tabla 38 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 38. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 2 con 3% de cemento

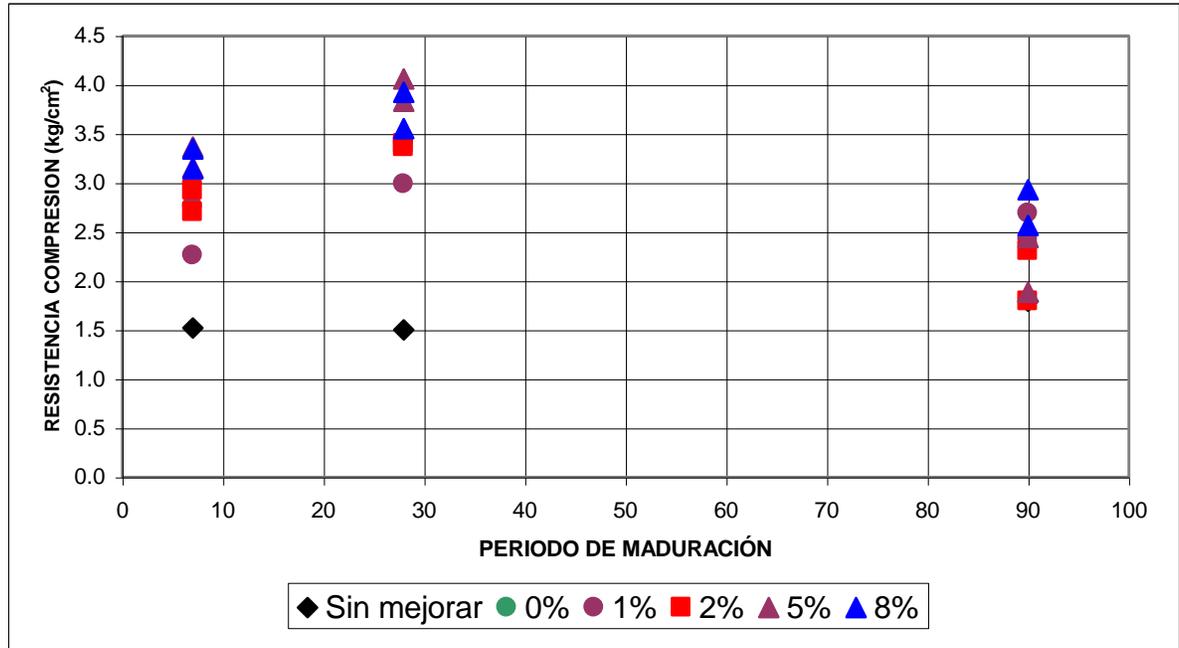
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
3% de cemento	1% de Silicato	2,76	3,41	2,69	4,27	3,56	3,92	31,6	33,5	33,0
	1% de Silicato	2,26	2,99	2,43	4,99	3,56	3,56	34,1	34,1	32,8
	2% de Silicato	2,92	3,40	1,79	2,49	2,85	2,14	31,4	30,2	29,9
	2% de Silicato	2,70	3,36	2,30	2,49	2,85	4,31	30,9	30,3	29,0
	5% de Silicato	3,36	3,83	2,44	3,56	2,85	3,21	32,7	31,9	30,9
	5% de Silicato	3,16	4,06	1,89	2,85	3,56	3,73	32,4	31,7	30,9
	8% de Silicato	3,14	3,55	2,57	2,85	2,85	2,49	28,7	28,0	26,2
	8% de Silicato	3,35	3,92	2,93	2,14	2,85	2,85	28,7	27,7	27,1

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 102 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 102. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 3% de cemento

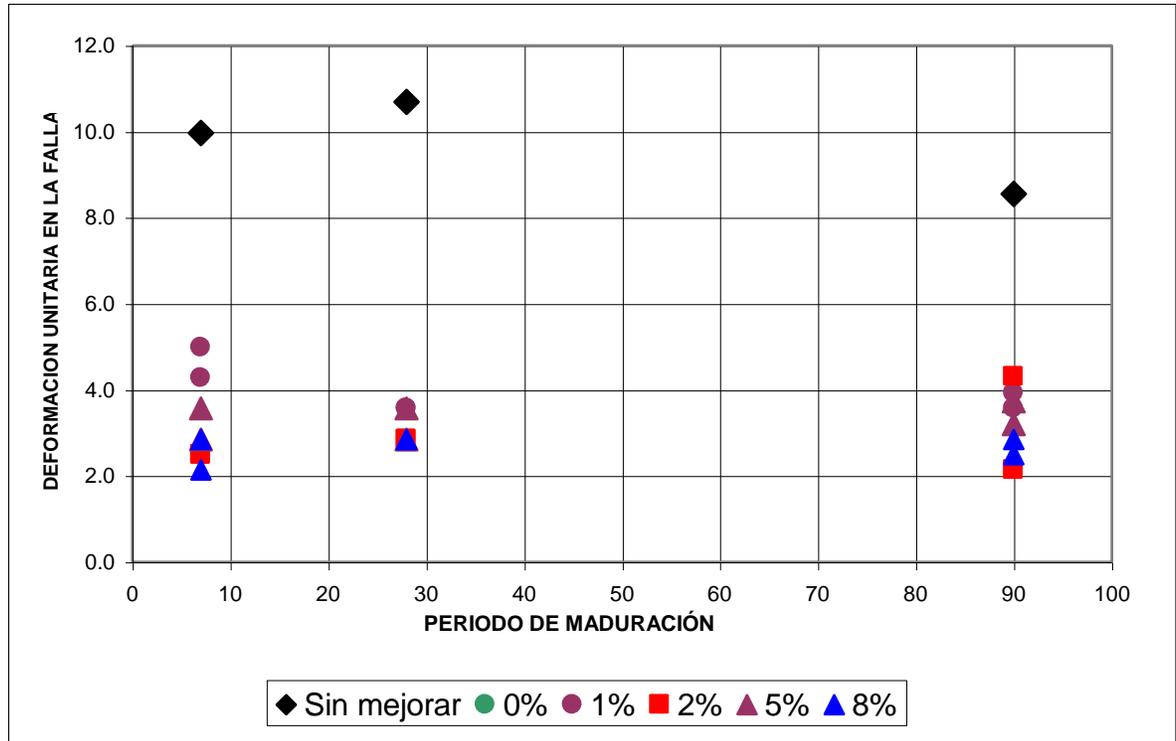


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa el porcentaje de silicato se incrementa la resistencia del suelo.
- ✓ La resistencia del suelo incrementa hasta los 28 días de curado a partir de los cuales empieza a disminuir.
- ✓ Para un periodo de curado de 90 días el efecto del silicato sobre la resistencia del suelo no es tan significativo.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 103 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 103. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 3% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato de calcio provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Para cantidades de silicato inferiores al 2% en la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la Deformación unitaria en la falla.
- ✓ Para cantidades de silicato del 2% o superiores el periodo de maduración no tiene efectos sobre la resistencia del suelo.

✓ **Suelo 2 con 4% de cemento**

En la tabla 39 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico de este suelo.

Tabla 39. Efecto de la adición del silicato de calcio en el suelo 2 con 4% de cemento

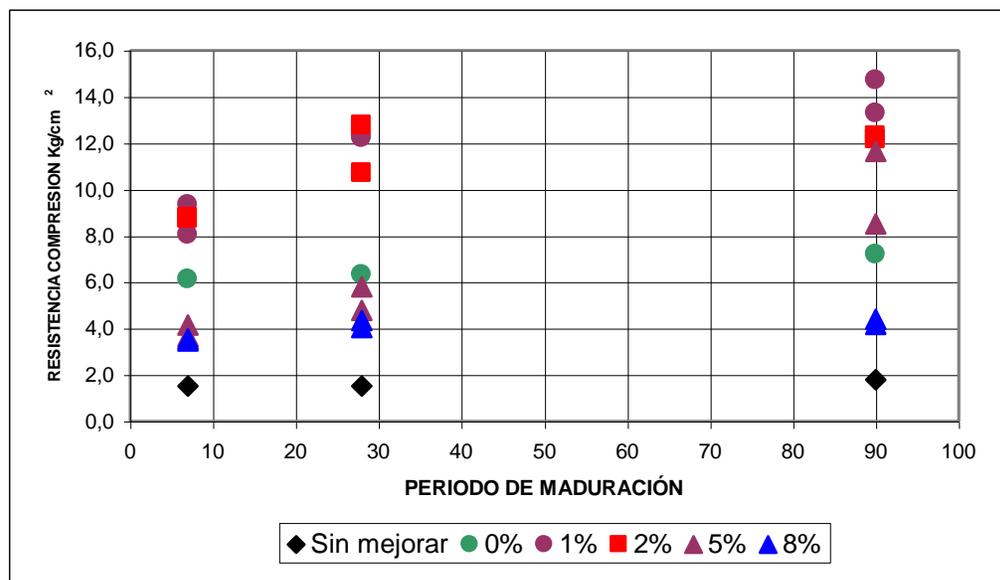
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
4% de cemento	0% de Silicato	6,11	6,30	7,20	3,21	2,85	2,14	35,8	31,7	30,0
	1% de Silicato	9,33	12,22	14,71	3,56	1,78	2,85	24,7	25,6	25,3
	1% de Silicato	8,04	12,28	13,28	3,56	2,14	1,78	25,8	26,3	25,6
	2% de Silicato	8,73	10,69	12,15	3,56	2,14	4,99	25,9	25,8	25,2
	2% de Silicato	8,79	12,76	12,29	3,56	2,49	4,27	25,7	25,7	25,0
	5% de Silicato	4,13	4,78	8,50	3,56	1,78	1,78	26,4	25,9	23,5
	5% de Silicato	3,64	5,78	11,64	3,56	2,85	2,14	24,9	25,7	26,5
	8% de Silicato	3,53	4,34	4,17	7,84	7,12	3,56	32,3	32,3	32,4
	8% de Silicato	3,45	4,04	4,38	7,84	5,70	3,56	32,3	32,3	32,4

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 104 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 104. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 4% de cemento

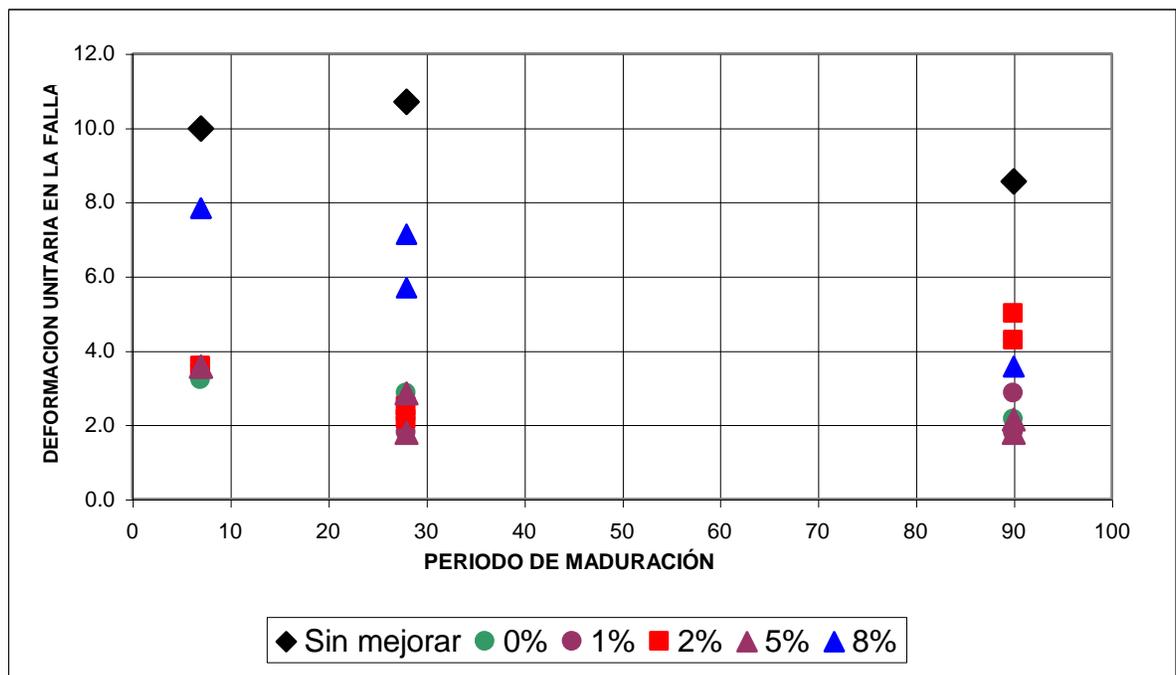


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para cantidades de silicato del 2% o menores se obtiene un incremento en la resistencia del suelo–cemento considerable.
 - ✓ Para cantidades de silicato del 5% o superiores la resistencia del suelo cemento disminuye.
 - ✓ Para cantidades de silicato del 5% o menores la resistencia se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ Para cantidades de silicato superiores al 5% el efecto del periodo de maduración en la resistencia del suelo no es significativo.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 105 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 105. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Cantidades de silicato del 5% o menores no producen efectos significativos en la deformación unitaria en la falla del suelo cemento.
- ✓ Cantidades de silicato del 8% producen un incremento inicial en la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento, pero esta disminuye con el tiempo.
- ✓ Para cantidades de silicato del 5% o menores el periodo de maduración no tiene efectos significativos en la resistencia del suelo.

✓ **Suelo 4 con 3% de cemento**

En la tabla 40 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico de este suelo.

Tabla 40. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 4 con 3% de cemento

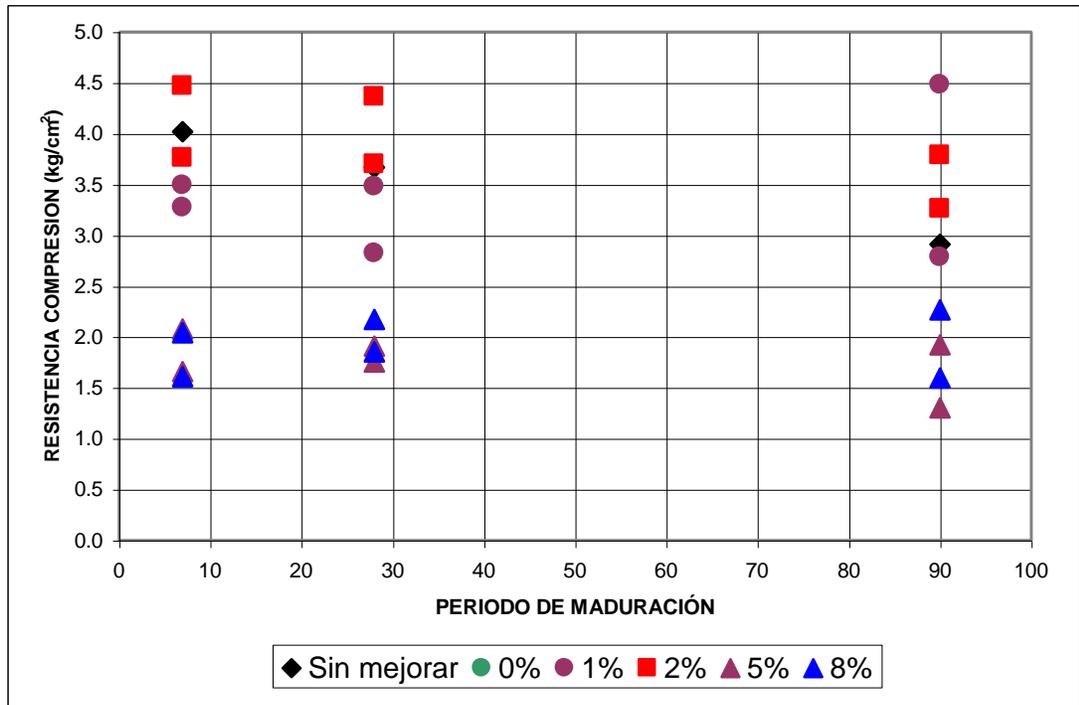
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)	Sin mejorar	4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
	1% de Silicato	3,49	3,48	4,48	2,14	2,14	3,21	36,4	45,9	35,6
3% de cemento	1% de Silicato	3,27	2,82	2,79	1,78	2,49	2,49	36,2	38,2	37,1
	2% de Silicato	4,47	3,70	3,26	2,14	2,14	2,14	36,6	37,4	37,3
	2% de Silicato	3,76	4,36	3,78	1,78	2,49	2,85	37,0	37,5	36,8
	5% de Silicato	1,66	1,91	1,92	1,42	1,42	1,78	36,6	38,2	37,1
	5% de Silicato	2,08	1,75	1,30	1,78	1,78	1,78	35,6	38,5	38,0
	8% de Silicato	2,04	1,85	2,26	1,78	1,78	2,14	39,3	38,8	38,3
	8% de Silicato	1,61	2,17	1,59	1,78	1,78	1,42	40,1	38,6	38,6

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 106 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 106. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 3% de cemento

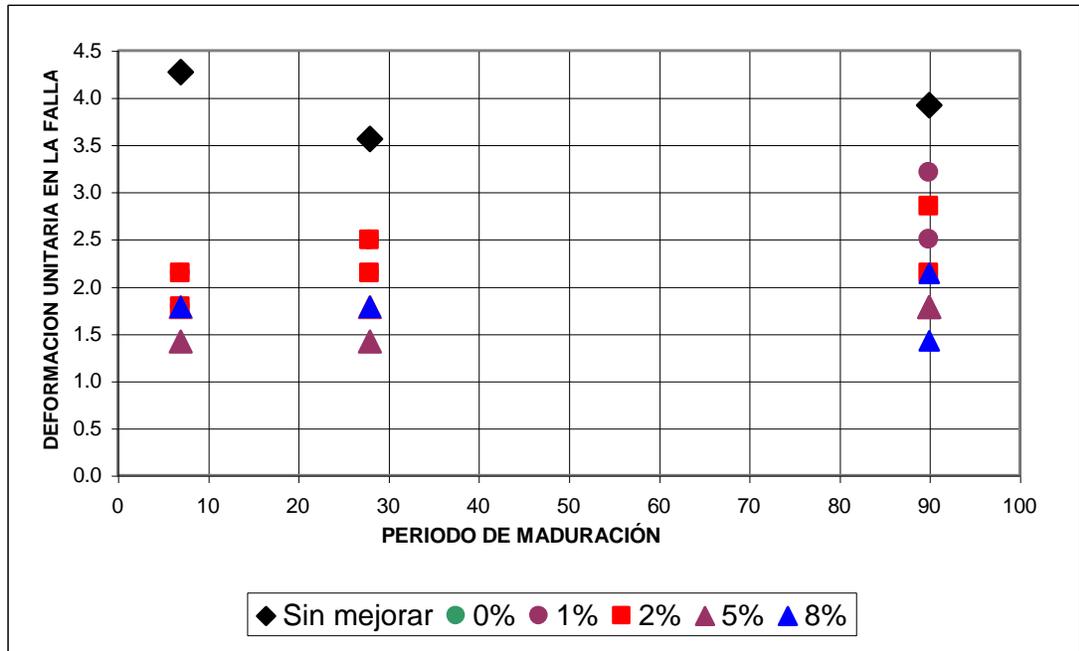


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Para porcentajes de silicato del 5% o superiores se obtiene una disminución en la resistencia del suelo.
 - ✓ Para porcentajes de silicato menores del 5% se obtiene un pequeño incremento en la resistencia del suelo.
 - ✓ No se observa influencia del periodo de maduración en la resistencia del suelo.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 107 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 107. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 3% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato provoca una disminución en la deformación unitaria del suelo.
- ✓ Para cantidades de silicato menores del 5% la deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que se incrementa el periodo de maduración.
- ✓ Para cantidades de silicato del 5% o mayores no se observan efectos del periodo de maduración en la Deformación unitaria en la falla.
- ✓ En la medida que aumenta la cantidad de silicato disminuye la deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 4 con 4% de cemento**

En la tabla 41 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico de este suelo.

Tabla 41. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 4 con 4% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
4% de cemento	0% de Silicato	5.62	4.78	6.20	2.85	1.78	2.85	ND	37.89	39.05
	1% de Silicato	3.63	3.17	3.26	4.27	4.99	4.99	45.00	44.56	44.65
	1% de Silicato	3.73	2.99	3.14	7.12	4.99	4.27	45.10	44.96	44.50
	2% de Silicato	3.26	3.29	3.94	4.99	4.27	4.27	44.67	43.42	43.54
	2% de Silicato	3.17	3.42	4.38	3.56	4.27	4.27	44.25	43.61	42.41
	5% de Silicato	2.33	2.82	4.14	4.27	4.27	4.99	46.79	46.92	44.88
	5% de Silicato	2.43	2.30	3.67	4.27	3.56	4.99	46.99	47.75	45.23
	8% de Silicato	2.79	2.77	3.36	3.56	4.27	3.56	44.90	46.51	44.96
	8% de Silicato	2.56	2.72	3.58	3.56	4.27	3.56	45.27	46.51	45.18

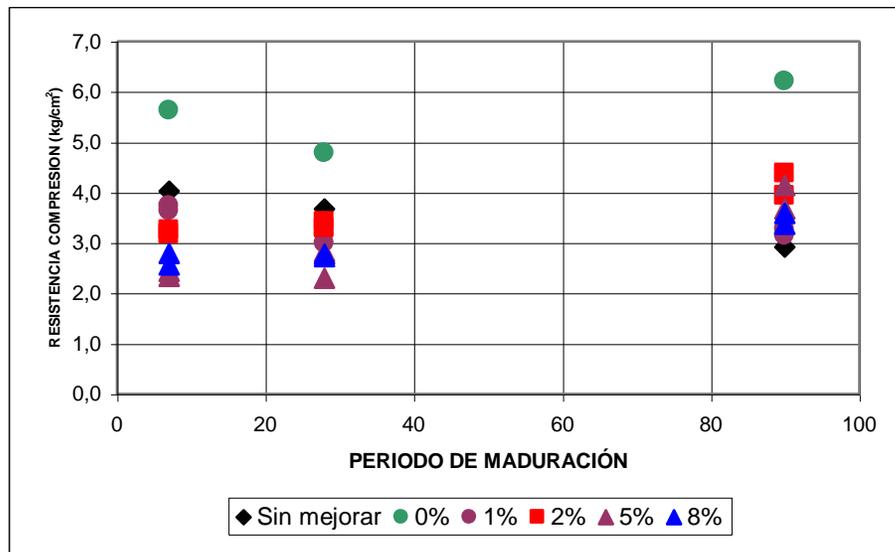
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 108 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 108. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada del suelo 4 con 4% de cemento

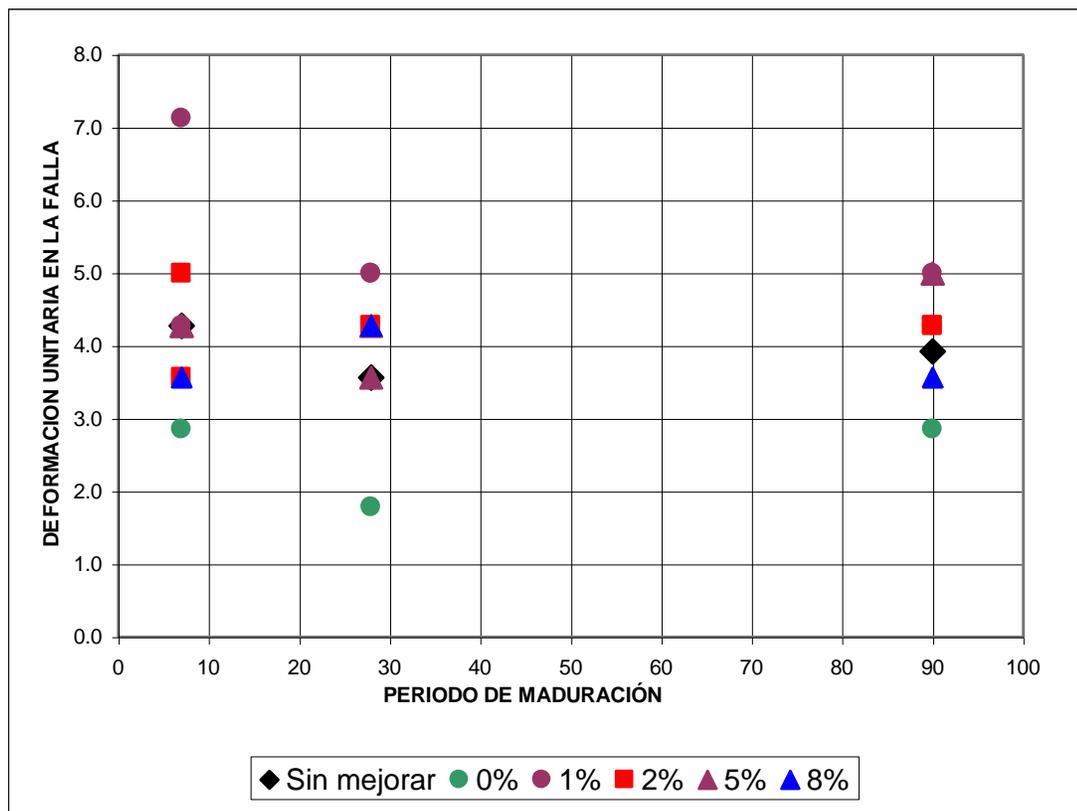


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce una disminución en la resistencia del suelo-cemento, para este contenido de cemento.
 - ✓ La resistencia del suelo cemento se incrementa con el aumento del periodo de maduración para todos los porcentajes de silicato.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 109 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 109. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo.

4.4. ANALISIS DEL EFECTO DEL TEXILAN 553 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

4.4.1 Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 y 4, porcentajes del 2 y 4% de cemento y porcentajes de texilán 553 del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briketa.

4.4.2 Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cemento

En la tabla 42 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 42. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 2 con 2% de cemento

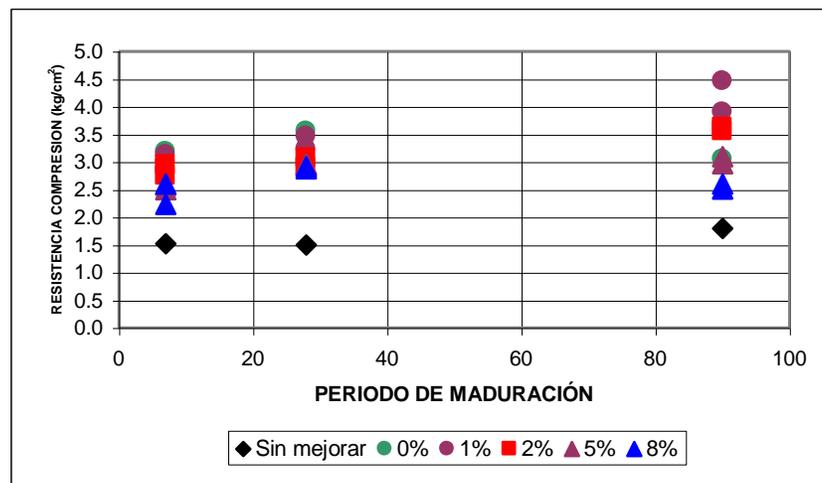
	Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)			
	Curado (días)	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
2% de cemento	0% de Texilán	3,18	3,55	3,05	4,27	3,56	2,85	31,0	31,9	30,6
	1% de Texilán	2,98	3,23	3,90	5,70	4,99	4,99	26,2	26,5	26,8
	1% de Texilán	3,13	3,47	4,46	5,70	5,70	5,70	26,2	26,5	26,1
	2% de Texilán	2,74	2,89	3,55	6,41	7,12	6,41	27,3	27,3	27,6
	2% de Texilán	2,95	3,07	3,63	6,41	6,41	5,70	27,2	27,3	27,2
	5% de Texilán	2,49	2,94	3,09	4,99	4,99	4,27	37,3	37,2	36,3
	5% de Texilán	2,57	2,96	2,96	4,99	4,99	4,27	37,4	37,0	36,1
	8% de Texilán	2,23	2,90	2,51	6,41	5,70	4,99	38,9	38,2	38,8
	8% de Texilán	2,60	2,87	2,60	5,70	5,70	5,70	39,0	37,8	38,3

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 110 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 110. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada inconfiada del suelo 2 con 2% de cemento

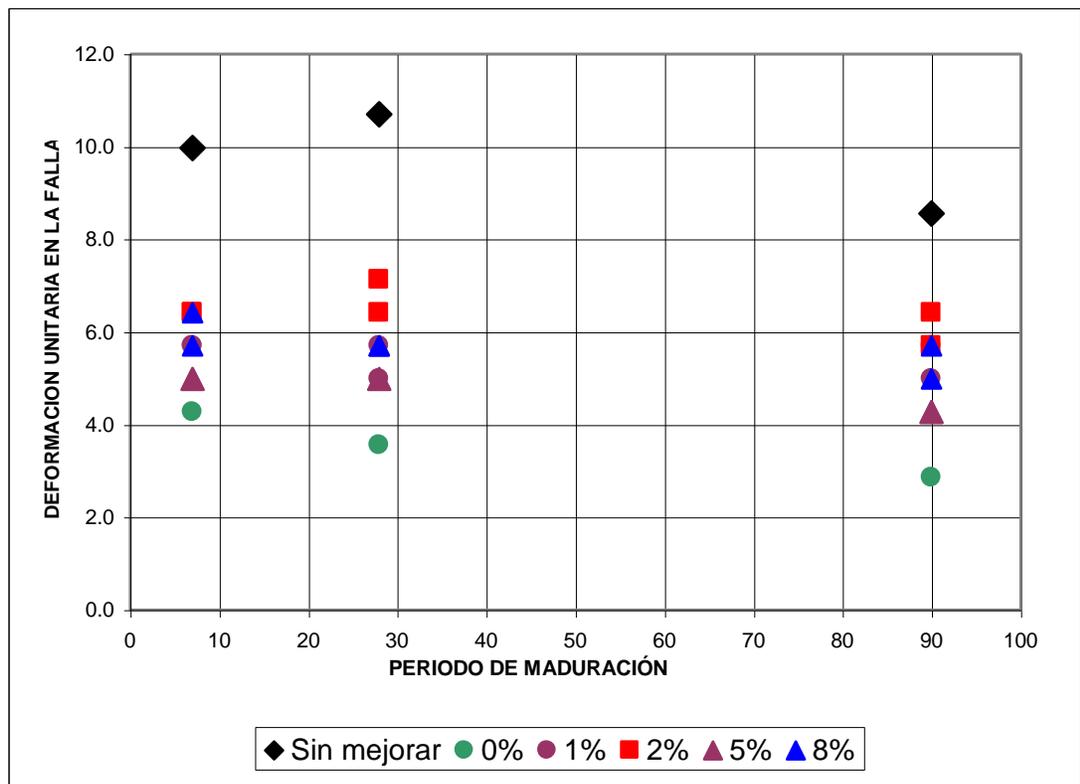


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de textilán produce una disminución en la resistencia del suelo–cemento.
 - ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de textilán disminuye la resistencia del suelo–cemento.
 - ✓ Para cantidades de textilán 553 del 5% o menores la resistencia del suelo se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ Para porcentajes de textilán del 8% la resistencia del suelo empieza a disminuir después de los 28 días de curado.
 - ✓ A los 90 días de curado se obtienen incrementos de la resistencia del suelo – cemento para adiciones de textilán del 1 y 2%.
- **Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 111 se muestra el efecto del textilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 111. Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del Texilán provoca un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento.
- ✓ La cantidad de Texilán 553 no es significativa en el incremento de la Deformación unitaria en la falla.
- ✓ El periodo de maduración no tiene efectos sobre la deformación unitaria en la falla de las muestras con Texilán.

✓ **Suelo 2 con 4% de cemento**

En la tabla 43 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 43. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 2 con 4% de cemento

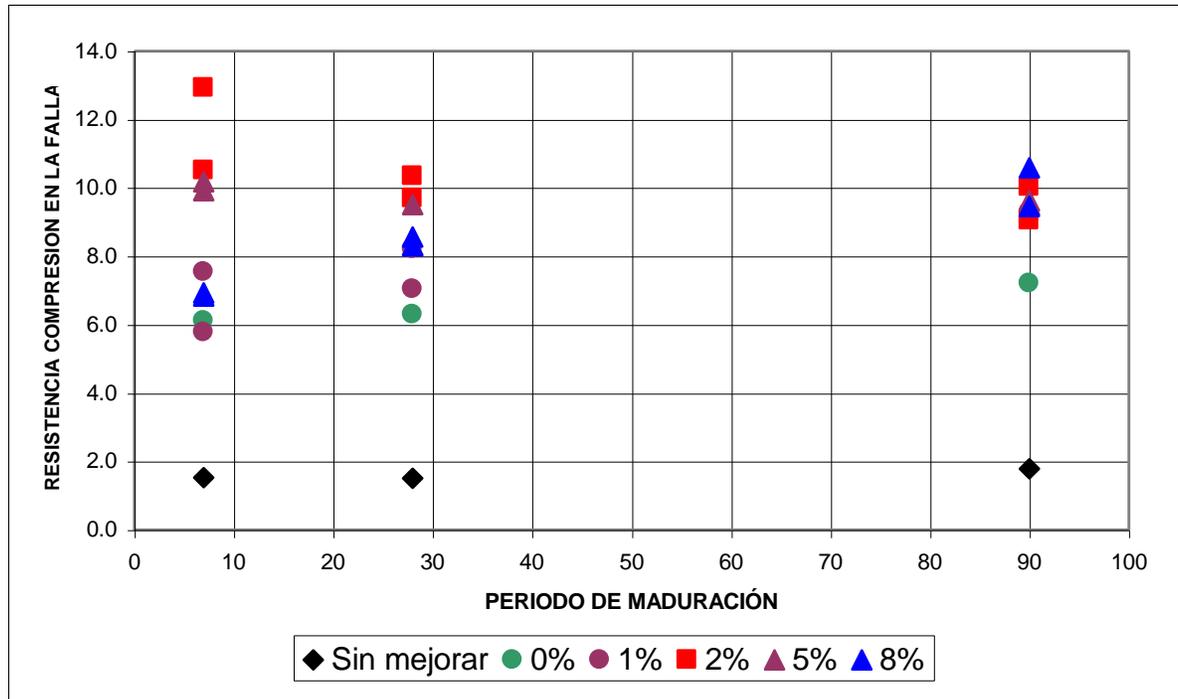
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
4% de cemento	0% de Texilán	6,11	6,30	7,20	3,21	2,85	2,14	35,8	31,7	30,0
	1% de Texilán	7,54	8,21	9,28	5,70	4,99	4,27	28,5	28,2	31,4
	1% de Texilán	5,78	7,03	9,12	5,70	4,99	4,27	28,7	29,0	28,0
	2% de Texilán	10,51	10,34	10,02	4,99	4,99	4,99	26,9	27,9	26,9
	2% de Texilán	12,91	9,69	9,04	4,99	4,27	3,92	26,9	27,2	26,6
	5% de Texilán	9,92	8,32	9,62	4,99	4,99	4,63	27,4	26,5	25,2
	5% de Texilán	10,18	9,50	9,51	4,99	4,99	4,27	27,0	28,7	26,1
	8% de Texilán	6,84	8,57	10,59	4,99	4,99	5,70	27,1	27,2	0,0
	8% de Texilán	6,92	8,29	9,44	4,99	5,70	4,27	27,6	27,7	27,2

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 112 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 112. Efecto del porcentaje de textilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 4% de cemento

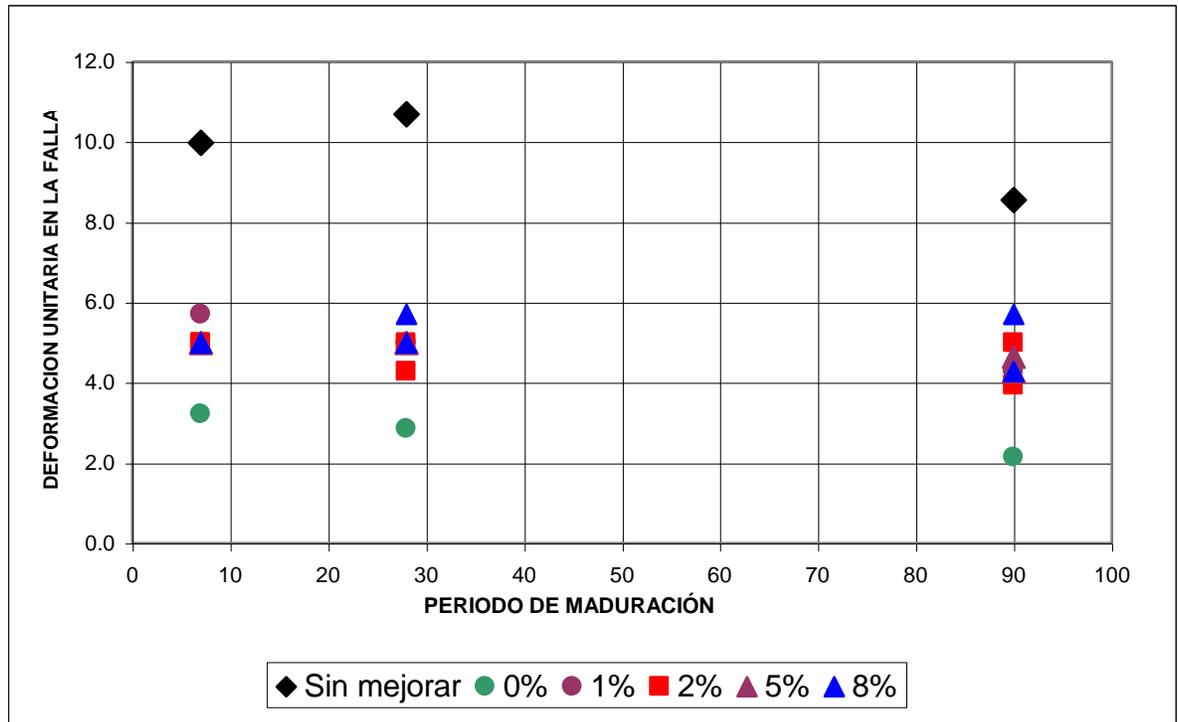


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de textilán produce un incremento en la resistencia del suelo–cemento.
 - ✓ Para cantidades de textilán del 2% o menores la resistencia del suelo–cemento aumenta en la medida que se incrementa la proporción de textilán .
 - ✓ Para cantidades de textilán mayores al 2% la resistencia del suelo–cemento disminuye en la medida que se incrementa la proporción de textilán con respecto a la resistencia obtenida con el 2% de textilán, pero en relación con el suelo cemento con 0% de textilán la resistencia sigue aumentando.
 - ✓ Para un periodo de curado de 90 días la cantidad de textilán no es significativa en la resistencia del suelo.
- **Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 113 se muestra el efecto del textilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 113. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria del suelo 2 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de Texilán permite incrementar la deformación unitaria en la falla del suelo-cemento.
- ✓ La cantidad de Texilán adicionada no influye considerablemente en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ No se observa efecto del periodo de maduración en la deformación del suelo.

✓ **Suelo 4 con 2% de cemento**

En la tabla 44 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cemento.

Tabla 44. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 4 con 2% de cemento

	Curado (días)	Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Sin mejorar	4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
2% de cemento	0% de Texilán	4,56	3,26	4,38	4,27	2,85	3,21	ND	38,7	39,1
	1% de Texilán	2,02	2,15	4,07	7,12	7,12	7,12	41,4	41,5	39,4
	1% de Texilán	1,84	2,41	3,08	9,26	7,84	4,99	41,8	42,1	40,0
	2% de Texilán	2,93	2,64	2,94	4,27	4,27	2,85	40,1	40,0	38,8
	2% de Texilán	2,33	2,32	3,06	3,56	4,63	3,56	40,2	40,4	38,8
	5% de Texilán	2,24	2,30	2,53	9,26	8,55	7,12	44,4	44,4	43,9
	5% de Texilán	1,64	2,27	3,22	7,12	7,84	7,12	46,0	45,1	44,2
	8% de Texilán	1,36	2,28	2,27	7,84	9,26	6,41	44,7	44,5	44,8
	8% de Texilán	1,82	2,45	2,49	8,55	9,26	7,84	44,7	44,7	43,0

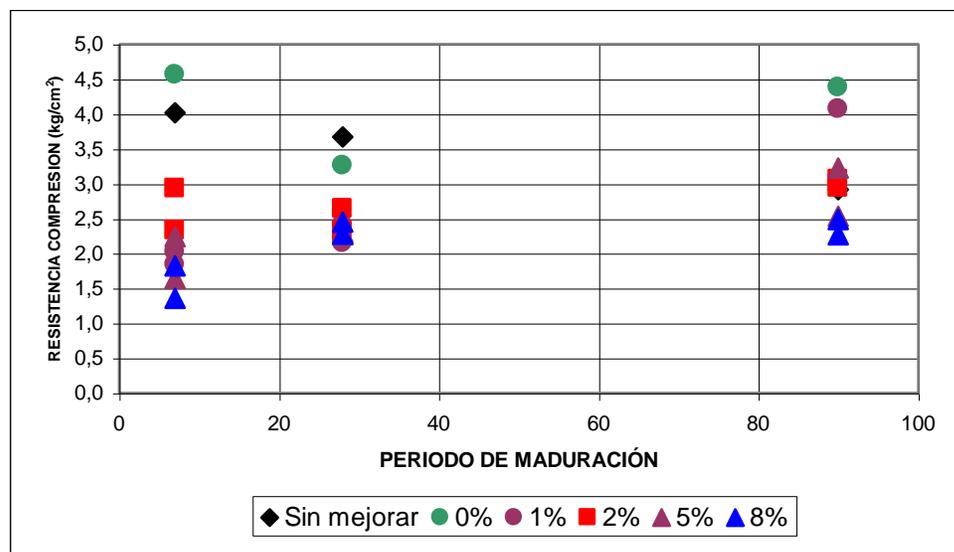
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 114 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 114. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 2% de cemento

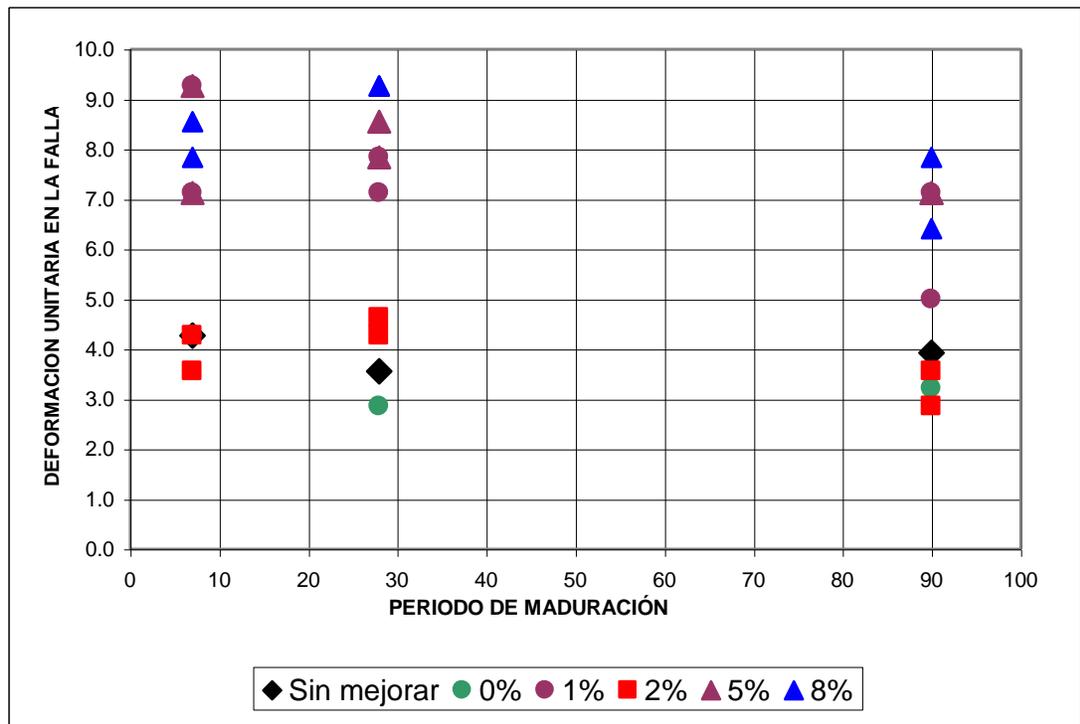


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de textilán 553 se presenta una disminución en la resistencia del suelo - cemento.
 - ✓ Con la adición de textilán en la medida que aumenta el periodo de maduración se incrementa la resistencia del suelo, pero esta no alcanza la resistencia del suelo-cemento.
- **Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 115 se muestra el efecto del textilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 115. Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de textilán produce un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo.

- ✓ Para porcentajes de texilán del 2% o menores la Deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que aumenta la cantidad de texilán .
- ✓ Para cantidades de texilán superiores al 2% la Deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que aumenta la cantidad de texilán .
- ✓ La Deformación unitaria en la falla disminuye con el incremento del periodo de maduración.

✓ **Suelo 4 con 4% de cemento**

En la tabla 45 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 45. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 4 con 4% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
4% de cemento	0% de Texilán	5,62	4,78	6,20	2,85	1,78	2,85	ND	37,9	39,1
	1% de Texilán	3,28	3,53	2,90	3,56	3,56	2,14	41,1	41,3	40,3
	1% de Texilán	3,20	2,84	3,24	3,56	2,85	2,85	42,2	42,7	40,3
	2% de Texilán	2,29	3,87	4,31	8,55	5,70	4,27	44,2	43,1	40,8
	2% de Texilán	2,23	4,98	3,17	4,27	4,99	4,27	43,4	41,6	42,7
	5% de Texilán	2,48	3,96	3,22	3,56	4,27	3,56	42,7	42,4	42,1
	5% de Texilán	2,48	3,51	3,57	4,27	3,56	3,56	42,5	42,2	41,3
	8% de Texilán	2,89	3,26	3,49	3,56	4,27	2,85	41,6	41,0	40,2
	8% de Texilán	2,90	2,69	3,00	4,27	2,85	2,85	41,7	41,0	40,4

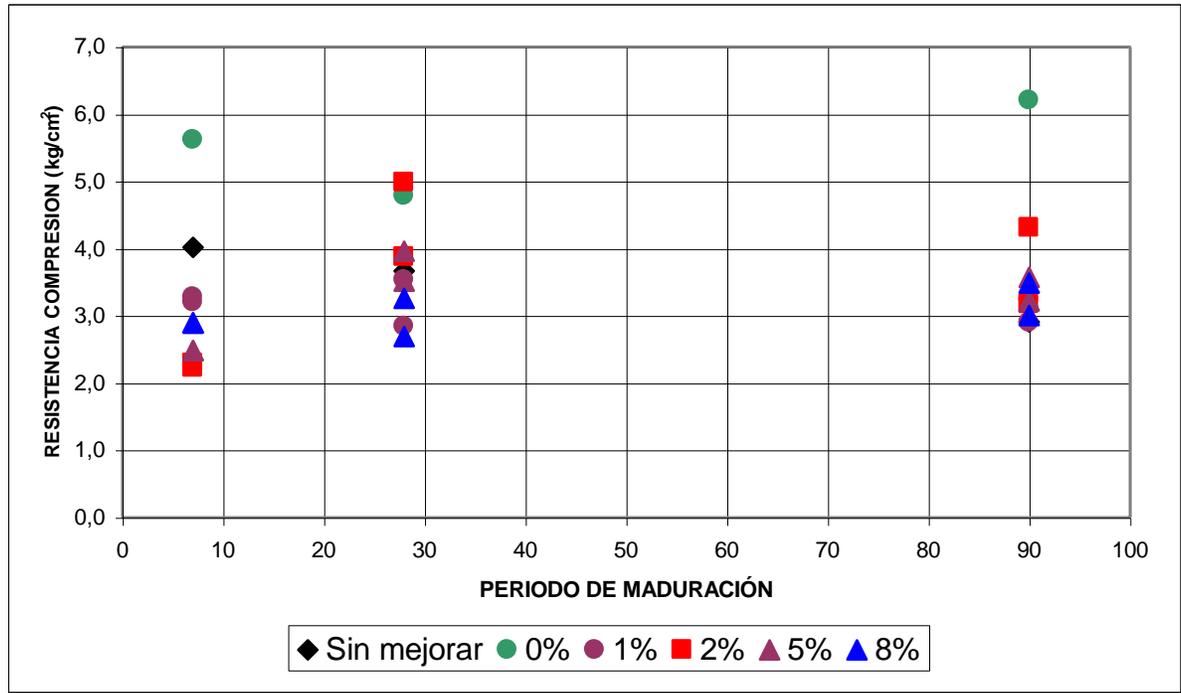
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 116 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 116. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 4% de cemento

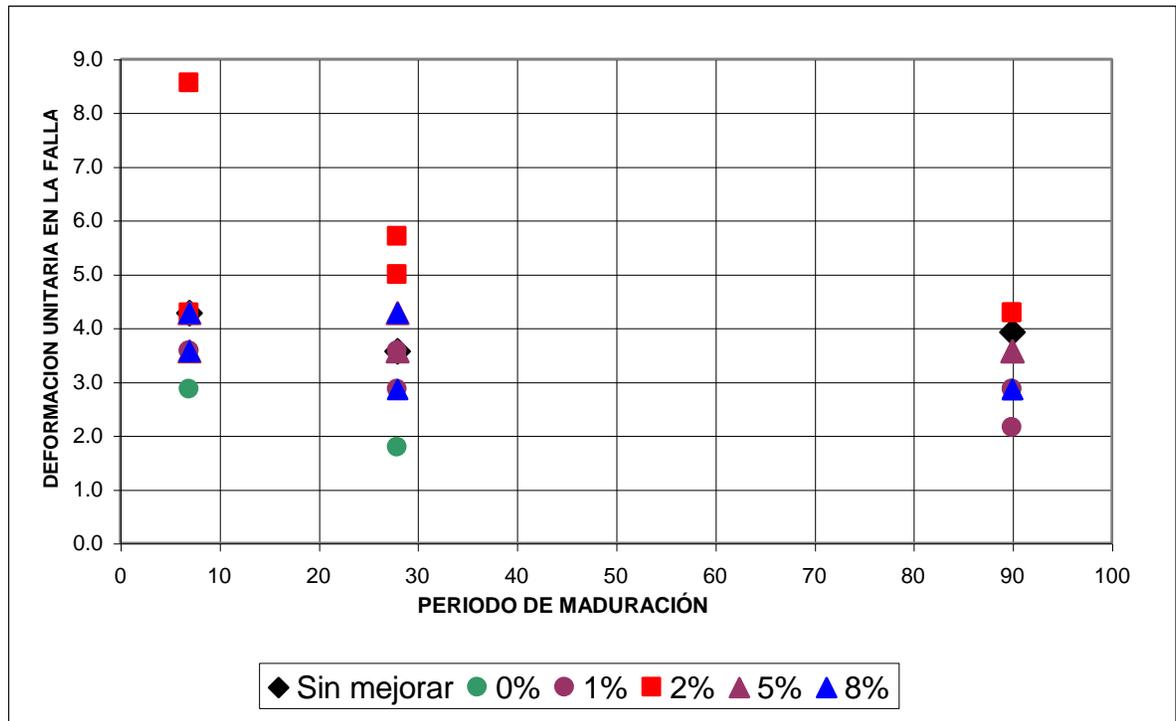


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de texilán produce una disminución en la resistencia del suelo-cemento.
- ✓ El incremento del periodo de maduración ayuda a que se presente un incremento en la resistencia del suelo.
- ✓ No se observan efectos considerables de la cantidad de texilán sobre la resistencia del suelo.
- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 117 se muestra el efecto del texilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 117. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de texilán 553 provoca un incremento inicial en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración disminuye la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ Para porcentajes de texilán 553 del 2% o menores en la medida que aumenta la cantidad de texilán aumenta la deformación unitaria en la falla.
- ✓ Para porcentajes de texilán 553 mayores del 2% en la medida que aumenta la cantidad de texilán disminuye la Deformación unitaria en la falla.
- ✓ Para un periodo de curado de 90 días la cantidad de texilán no tiene una influencia apreciable en la deformación unitaria en la falla del suelo.

4.5. ANALISIS DEL EFECTO DEL CONSTRUCRIL 1662 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

4.5.1 Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelo 2 y 4, proporciones de cemento del 2 y 4% y porcentajes de construcril 1662 del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briketa.

4.5.2 Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cemento

En la tabla 46 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico mecánico del suelo - cemento.

Tabla 46. Efecto de la adición de construcril 1662 en el suelo 2 con 2% de cemento

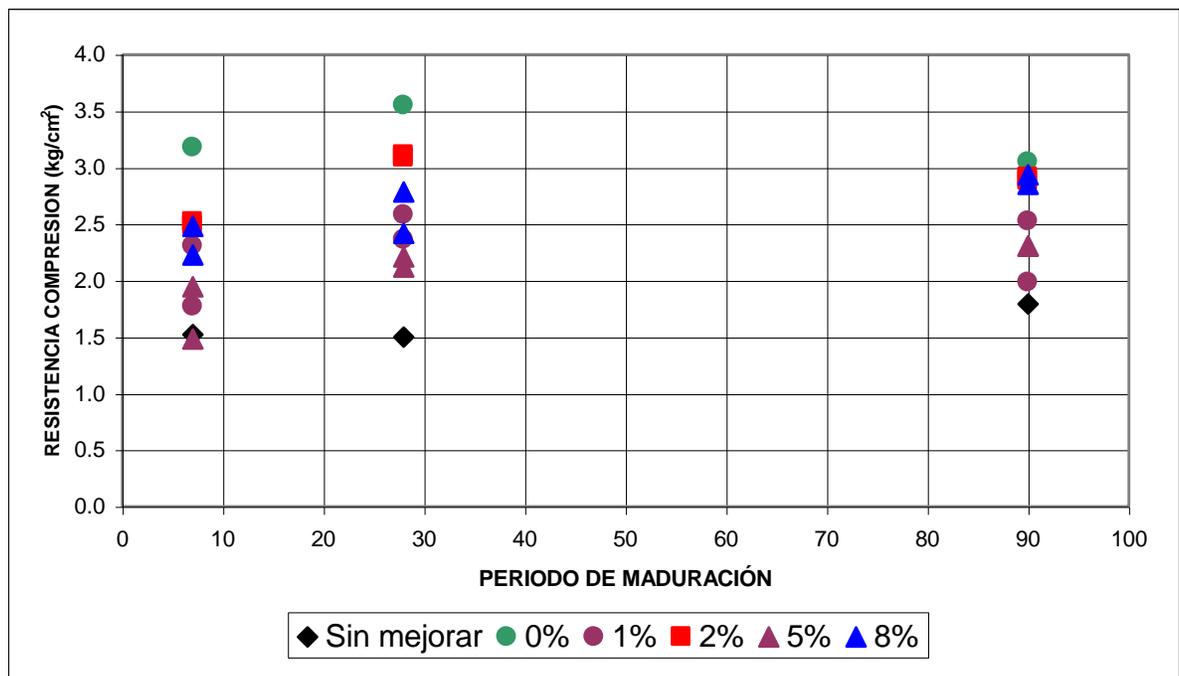
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,85	33,09	30,30
2% de cemento	0% de Construcril	3,18	3,55	3,05	4,27	3,56	2,85	31,04	31,94	30,61
	1% de Construcril	1,77	2,36	2,53	7,84	9,26	8,55	41,35	40,82	39,74
	1% de Construcril	2,30	2,58	1,98	7,84	7,12	7,12	40,71	40,65	39,66
	2% de Construcril	2,52	3,09	2,91	5,70	4,99	5,70	39,49	37,46	37,67
	2% de Construcril	2,49	3,11	2,89	4,27	5,70	5,70	39,69	40,64	38,04
	5% de Construcril	1,48	2,21	2,31	9,26	7,84	6,41	41,28	40,22	38,60
	5% de Construcril	1,94	2,12	2,30	7,84	9,26	8,55	40,32	40,38	39,81
	8% de Construcril	2,48	2,78	2,93	7,12	7,12	6,41	39,08	38,85	38,11
	8% de Construcril	2,23	2,42	2,85	7,84	7,12	7,12	39,48	38,97	38,70

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 118 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 118. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada del suelo 2 con 2% de cemento



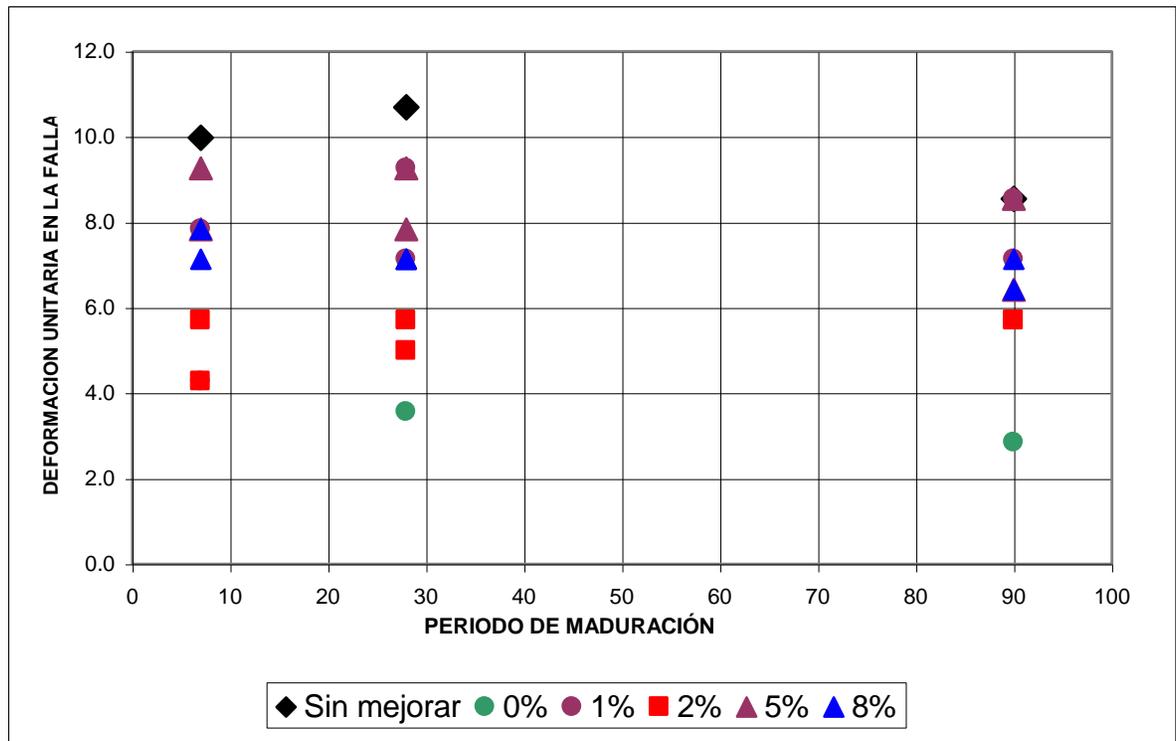
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del construcril produce una disminución en la resistencia del suelo – cemento para todos los porcentajes usados.
- ✓ Las mayores resistencias se obtiene para una cantidad de construcril del 2%.
- ✓ Para periodos de maduración superiores a los 28 días el incremento de la resistencia no es significativo y en algunos casos disminuye..
- ✓ Para porcentajes de construcril superiores al 2% no se observa una tendencia clara de su influencia en la resistencia del suelo – cemento.

- ✓ Para un periodo de maduración de 90 días los resultados de la resistencia del suelo-cemento y las muestra con 2 y 8% de construcril son muy similares.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 119 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 119. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril permite incrementar la Deformación unitaria en la falla del suelo cemento.
- ✓ Para cantidades de construcril del 2% o menores la Deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que se incrementa el contenido de construcril.

- ✓ Para cantidades de construcril superiores al 2% se incrementa la Deformación unitaria en la falla del suelo – cemento.
- ✓ Para un periodo de maduración de 90 días no es tan significativa el porcentaje de construcril en el incremento de la Deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 2 con 4% de cemento**

En la tabla 47 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 47. Efecto de la adición del construcril 1662 en el suelo 2 con 4% de cemento

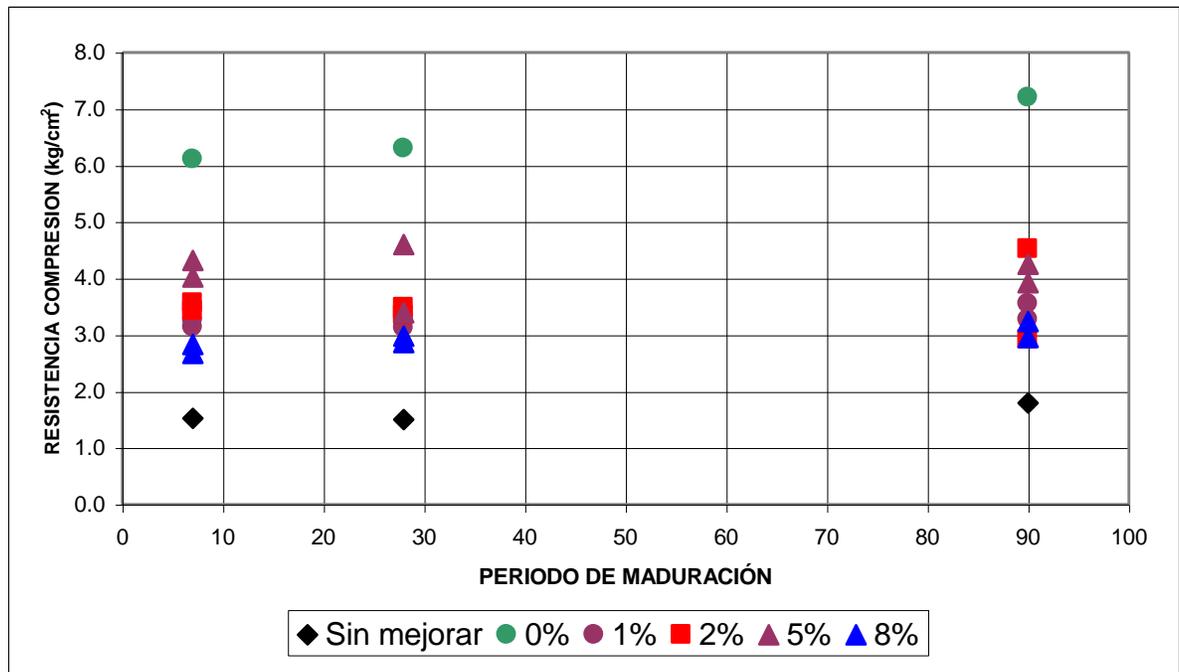
		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		1,52	1,50	1,79	9,97	10,69	8,55	32,9	33,1	30,3
4% de cemento	0% de construcril	6,11	6,30	7,20	3,21	2,85	2,14	35,8	31,7	30,0
	1% de construcril	3,26	3,13	3,27	5,70	4,27	4,99	40,3	40,4	39,4
	1% de construcril	3,13	3,30	3,55	5,70	5,70	4,99	40,5	40,1	39,3
	2% de construcril	3,56	3,48	4,52	4,99	4,27	3,56	38,9	39,3	37,2
	2% de construcril	3,43	3,35	2,92	4,99	3,56	2,85	39,2	39,0	38,1
	5% de construcril	4,32	3,39	4,24	4,27	2,85	4,27	37,1	37,6	36,4
	5% de construcril	4,02	4,59	3,92	4,27	3,56	3,56	37,2	36,9	36,4
	8% de construcril	2,82	2,98	3,23	4,63	4,27	3,56	38,2	37,9	37,0
	8% de construcril	2,67	2,87	2,96	4,27	4,27	4,27	38,2	38,3	37,1

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 120 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 120. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 4% de cemento

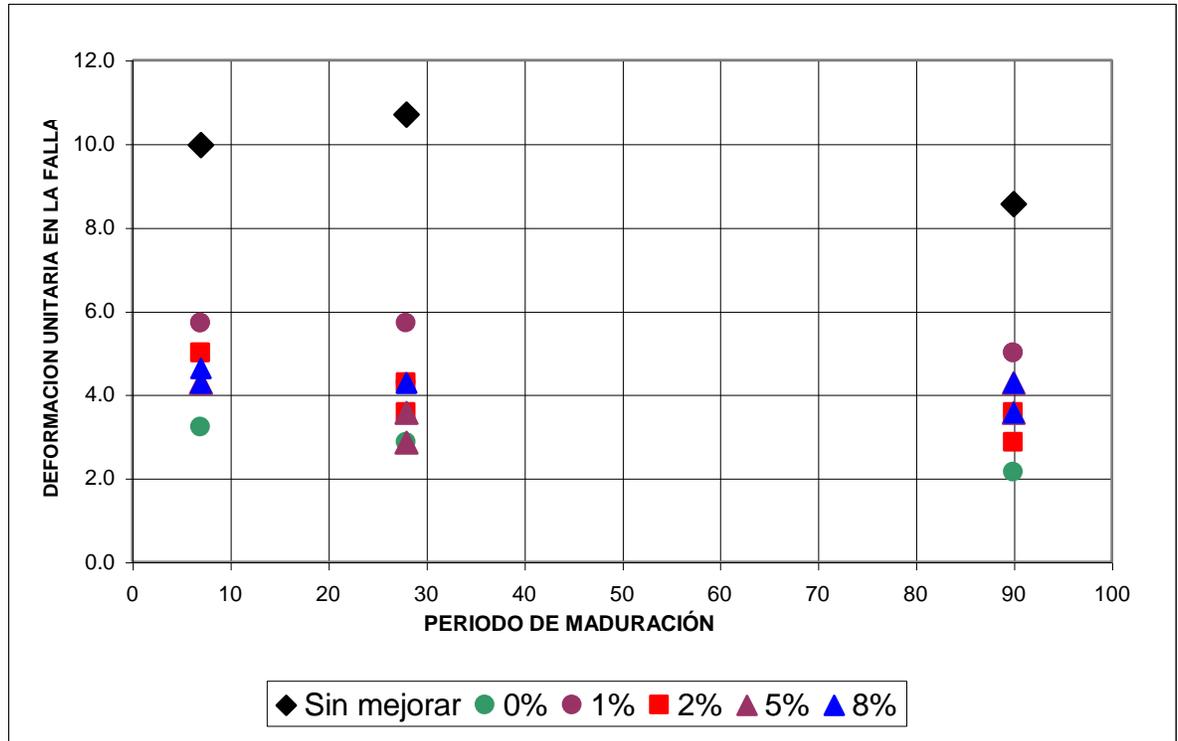


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera disminución en la resistencia del suelo-cemento en todos los casos.
- ✓ La influencia del periodo de maduración en la resistencia del suelo es despreciable.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla.**

En la ilustración 121 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 121. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera un incremento en la Deformación unitaria en la falla del suelo cemento.
- ✓ En la medida que se incrementa el periodo de maduración, disminuye un poco la deformación unitaria en la falla del suelo.

✓ **Suelo 4 con 2% de cemento**

En la tabla 48 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 48. Efecto de la adición del construcril 1662 del suelo 4 con 2% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,39	48,80	49,69
2% de cemento	0% de Construcril	4,56	3,26	4,38	4,27	2,85	3,21	ND	38,65	39,08
	1% de Construcril	2,58	2,10	2,65	10,69	9,26	9,97	44,03	42,52	43,17
	1% de Construcril	2,51	2,47	2,29	9,97	11,40	7,84	43,97	43,25	43,76
	2% de Construcril	2,16	2,30	5,06	7,84	7,84	6,41	43,92	42,43	40,84
	2% de Construcril	2,16	2,49	4,93	8,55	8,55	7,12	44,22	42,87	41,05
	5% de Construcril	2,91	2,92	3,72	7,12	7,12	7,84	41,62	41,49	41,08
	5% de Construcril	2,89	3,50	2,91	5,70	8,55	4,99	41,31	41,52	40,93
	8% de Construcril	2,33	MD	3,67	9,97	MD	8,55	41,80	MD	38,14
	8% de Construcril	2,44	2,39	3,49	9,26	9,26	9,26	41,97	41,85	40,78

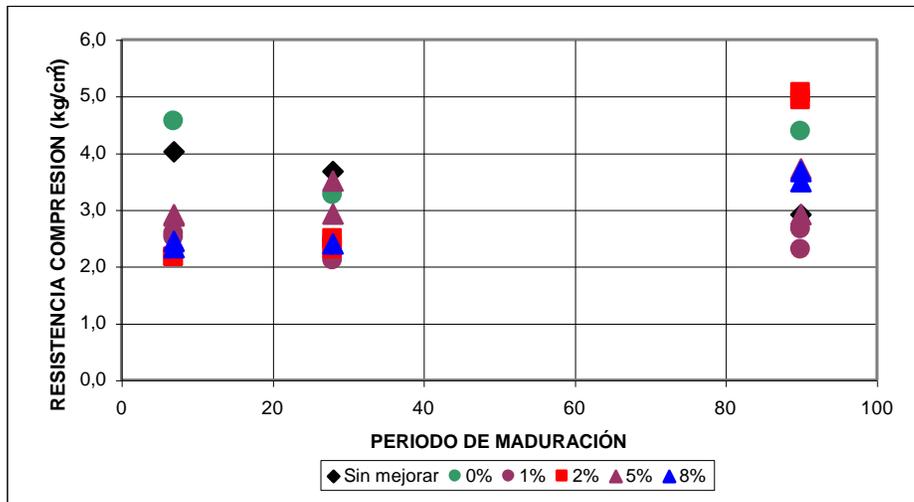
MD: Muestra dañada
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 122 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 122. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada del suelo 4 con 2% de cemento

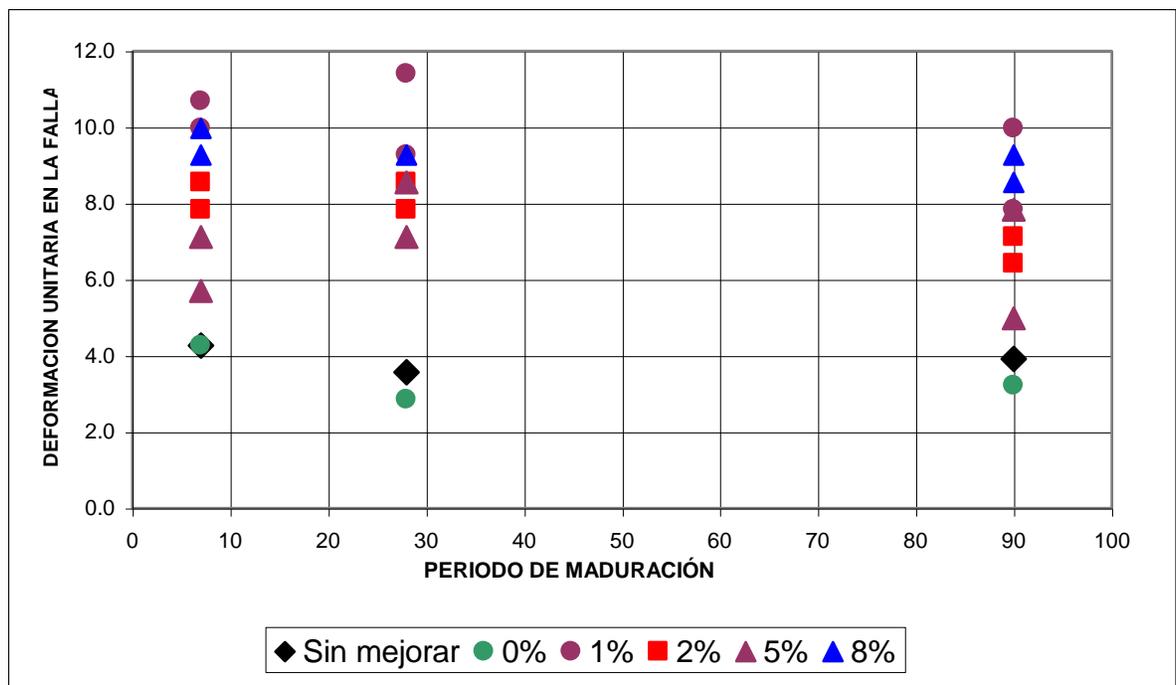


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril al suelo cemento inicialmente produce una disminución en la resistencia.
 - ✓ La resistencia del suelo se incrementa con el tiempo, pero en relación con la resistencia obtenida a los 7 días de curado, pero es menor que la presentada en el suelo cemento con 0% de construcril.
 - ✓ Para un periodo de curado de 7 días la cantidad de construcril no tiene influencia significativa en la resistencia del suelo-cemento.
 - ✓ Para un periodo de curado de 90 días la adición del 2% de construcril da mayores resistencias que las del suelo-cemento.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 123 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 123. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril 1662 permite incrementar la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento.
- ✓ Las mayores deformaciones en la falla se presentan para el 1% de construcril 1662.
- ✓ Para cantidades de construcril 1662 del 5% o menores la deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que aumenta la cantidad de construcril.
- ✓ Para cantidades de construcril superiores al 5% la deformación unitaria en la falla del suelo–cemento aumenta con el contenido de construcril.
- ✓ No se observa efecto claro del periodo de maduración en la variación de la deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 4 con 4% de cemento**

En la tabla 49 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 49. Efecto de la adición del construcril 1662 del suelo 4 con 4% de cemento

		Resistencia Kg/cm ²			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		4,02	3,67	2,91	4,27	3,56	3,92	38,4	48,8	49,7
45 de cemento	0% de construcril	5,62	4,78	6,20	2,85	1,78	2,85	ND	37,9	39,1
	1% de construcril	2,98	4,28	3,91	6,41	7,12	4,99	41,0	41,4	39,9
	1% de construcril	3,88	3,98	3,88	4,27	5,70	4,99	39,4	41,4	40,4
	2% de construcril	3,32	2,63	2,67	9,26	7,84	7,84	42,7	43,7	42,3
	2% de construcril	3,41	2,92	3,03	9,26	7,12	7,12	42,1	43,1	42,1
	5% de construcril	4,06	3,84	4,17	7,12	7,84	6,41	40,2	41,2	40,7
	5% de construcril	3,80	3,20	3,94	5,70	4,99	4,99	39,8	41,2	40,1
	8% de construcril	3,42	2,92	3,36	7,84	8,55	7,84	41,7	42,9	35,4
	8% de construcril	2,72	2,83	3,13	6,41	8,55	7,12	41,2	42,1	41,5

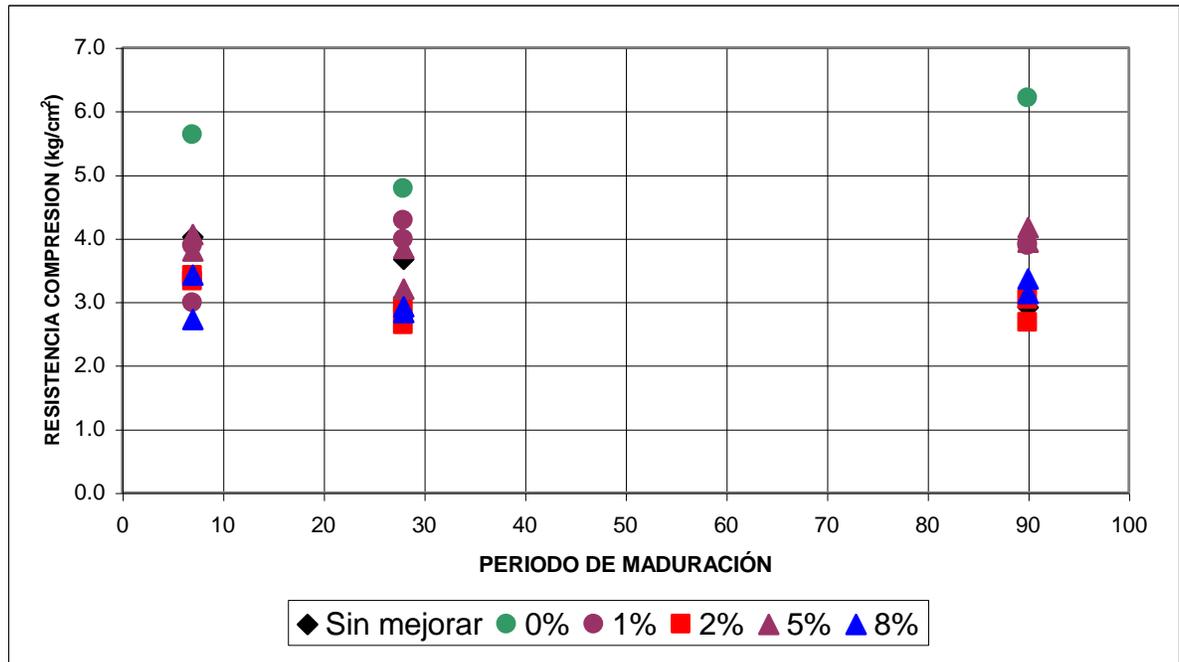
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

➤ **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la Ilustración 124 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 124. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 4% de cemento



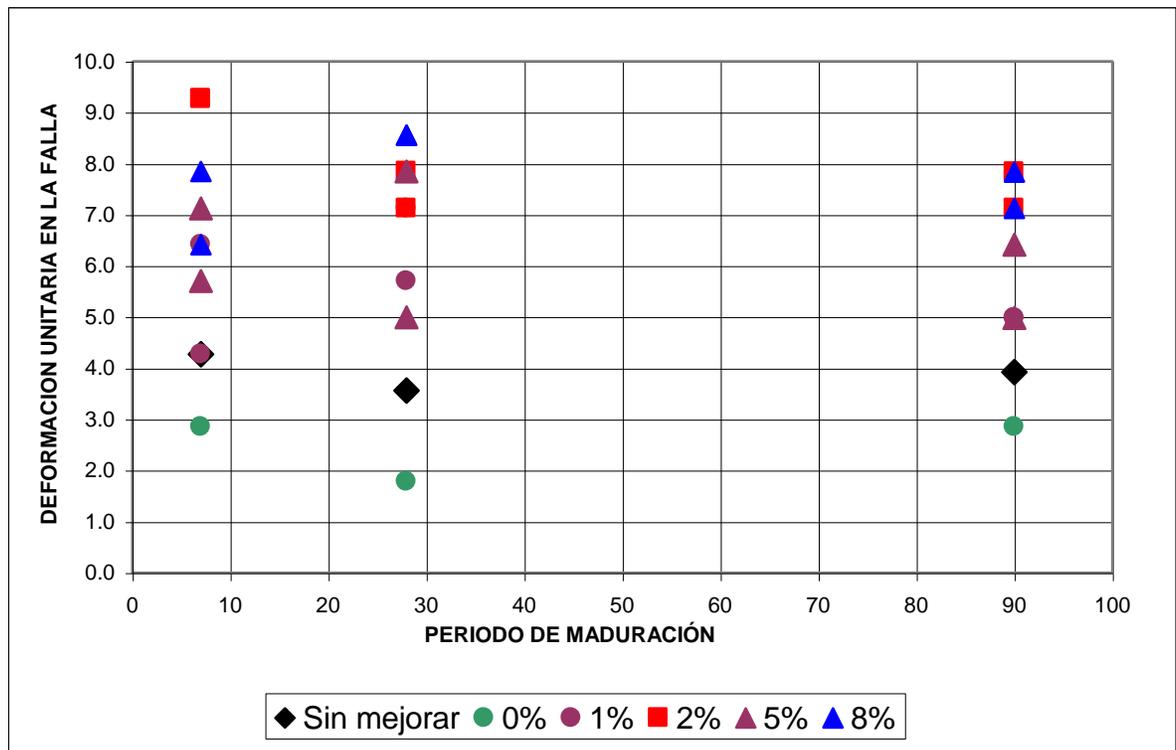
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera una disminución en la resistencia del suelo-cemento y en algunos casos hasta del suelo solo.
- ✓ No se observa influencia del periodo de maduración en la resistencia del suelo.
- ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de construcril se disminuye la resistencia del suelo-cemento.
- ✓ Para cantidades de construcril superiores al 1% no se presentan disminución de la resistencia con el incremento de la proporción de construcril.

➤ **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 125 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 125. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cemento



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se puede inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril 1662 genera un notable incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo cemento.
- ✓ La variación del porcentaje de construcril no provoca cambios significativos en la Deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ No se observa un efecto del periodo de maduración en la deformación unitaria en la falla.

5. ANALISIS DEL EFECTO DE UN ESTABILIZANTE EN EL SUELO-CAL

5.1. INTRODUCCION

En este capítulo se propone estudiar si la adición de un químico o un polímero permite mejorar la propiedades físico-mecánicas de los suelos estabilizados con cal.

Al igual que en el capítulo anterior la utilización de todos los suelos, para esta etapa de la investigación, requeriría de la realización de un gran número de ensayos que por circunstancias de tiempo y recursos no es posible realizar. Adicionalmente, para el cumplimiento de los objetivos planteados es suficiente el estudio de dos tipos diferentes de suelos que presenten un buen comportamiento frente a la estabilización con cal.

Del capítulo 4 se puede observar que los suelos que en términos generales presentan un mejor comportamiento al ser mejorados con cal son los suelos 2 y 4.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente a cerca de la necesidad de limitar el número de ensayos debido a la escasez de tiempo y recursos, se definieron los porcentajes de cal con que mejor se comportan los suelos a fin de adicionarles los otros estabilizantes para observar los efectos que estos presentan sobre los suelos estabilizados con cal. Con base en lo obtenido en el capítulo 4 se puede observar que cantidades del 2 y 4% de cal dan buenos resultados en el mejoramiento de los suelos razón por la cual se usaran para el estudio del presente capítulo.

5.2. ANALISIS DEL EFECTO DEL DICLORURO DE SODIO EN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO-CAL

5.2.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto de la dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cal se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 y 4, porcentajes del 2 y 4% de cal y porcentajes de dicloruro de sodio del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.

- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briqueta.

5.2.2. Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cal

En la tabla 50 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico del suelo - cal.

Tabla 50. Efecto de la adición de dicloruro de sodio en el suelo 2 con 2% de cal

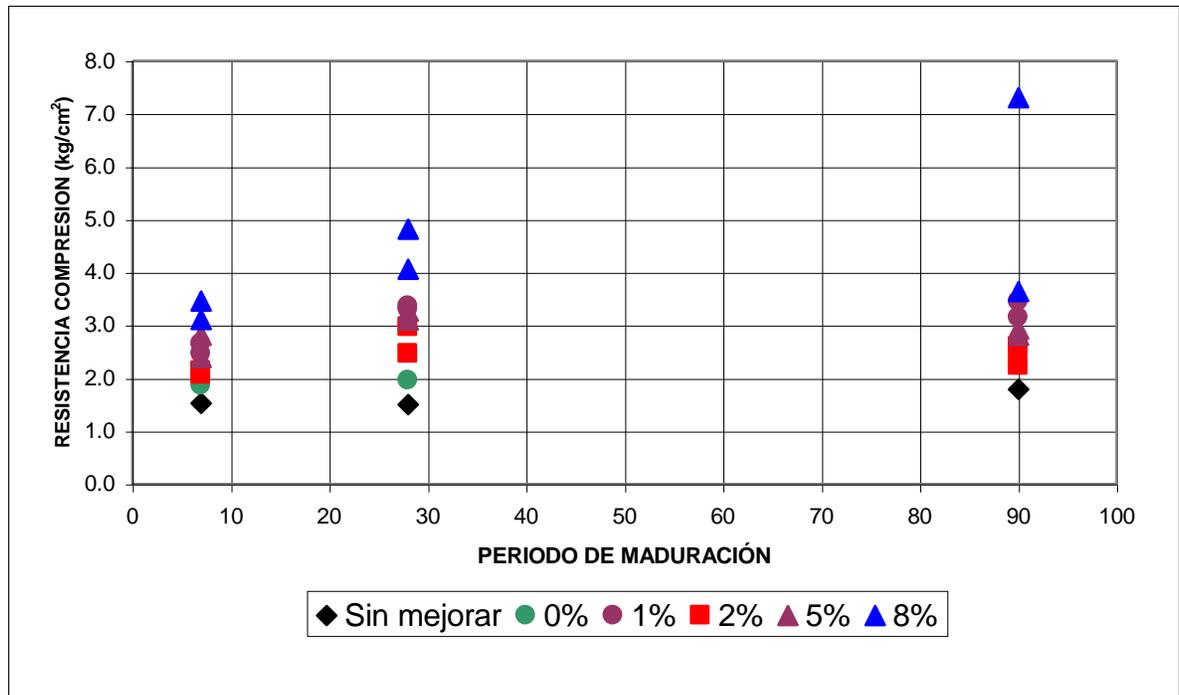
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin mejorar	1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
2% de cal	0% de Dicloruro	1.86	1.96	2.24	4.99	7.12	5.70	35.67	36.70	34.69
	1% de Dicloruro	2.65	3.30	3.45	3.21	3.56	3.56	40.10	40.37	39.63
	1% de Dicloruro	2.46	3.36	3.15	3.56	3.56	3.56	40.15	39.95	39.91
	2% de Dicloruro	2.13	2.97	2.23	3.56	4.10	3.56	41.16	41.13	41.11
	2% de Dicloruro	2.07	2.46	2.59	4.27	3.56	4.27	41.50	41.20	44.17
	5% de Dicloruro	2.40	3.26	2.94	3.56	3.56	3.56	38.95	38.98	39.09
	5% de Dicloruro	2.81	3.10	2.81	3.92	3.56	3.56	38.95	38.69	39.13
	8% de Dicloruro	3.12	4.82	3.64	3.56	4.27	3.56	37.46	36.40	37.31
	8% de Dicloruro	3.47	4.05	7.30	3.92	4.27	4.63	37.39	38.45	34.37

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 126 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo - cal para diferentes periodos de curado.

Ilustración 126. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 2 con 2% de cal

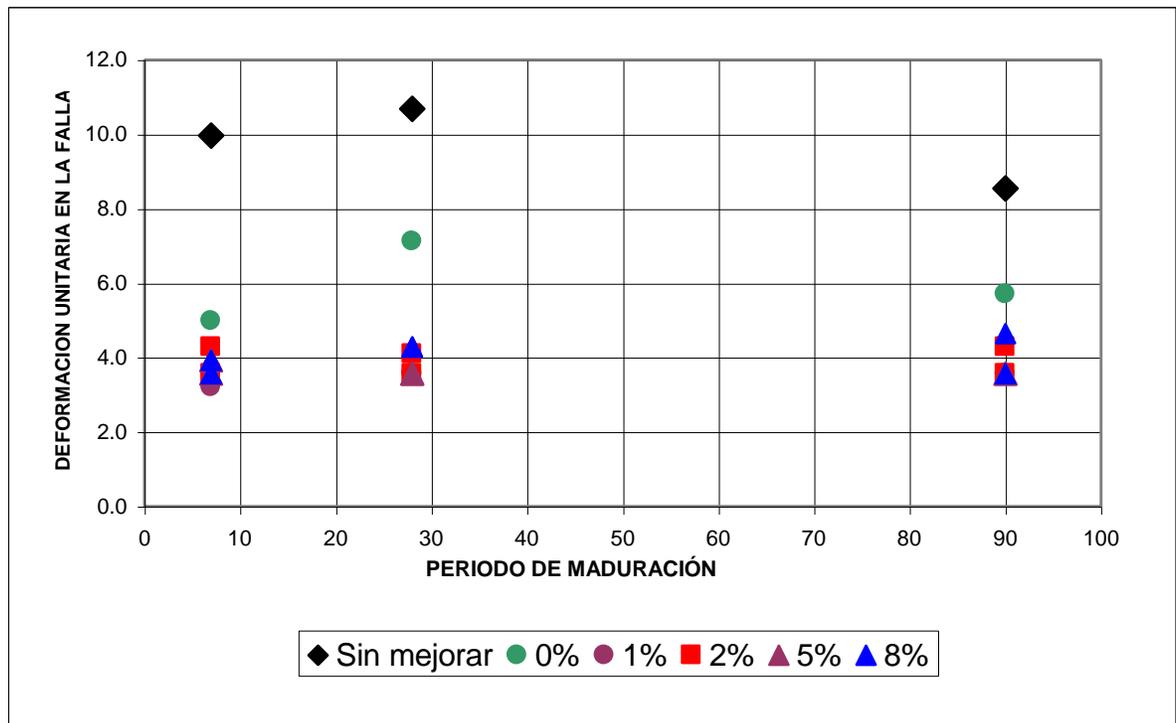


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro permite obtener un incremento en la resistencia del suelo-cal en todos los casos pero mucho menor que solo cal al 8%.
 - ✓ La resistencia del suelo-cal se incrementa en la medida que se aumenta la cantidad de dicloruro.
 - ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se presentan leves incrementos en la resistencia del suelo-cal.
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 127 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 127. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria del suelo 2 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro de sodio produce una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ La cantidad de dicloruro adicionada no afecta la disminución de la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ El periodo de maduración no afecta la disminución de la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

✓ **Suelo 2 con 4% de cal**

En la tabla 51 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 51. Efecto de la adición del dicloruro de sodio en el suelo 2 con 4% de cal

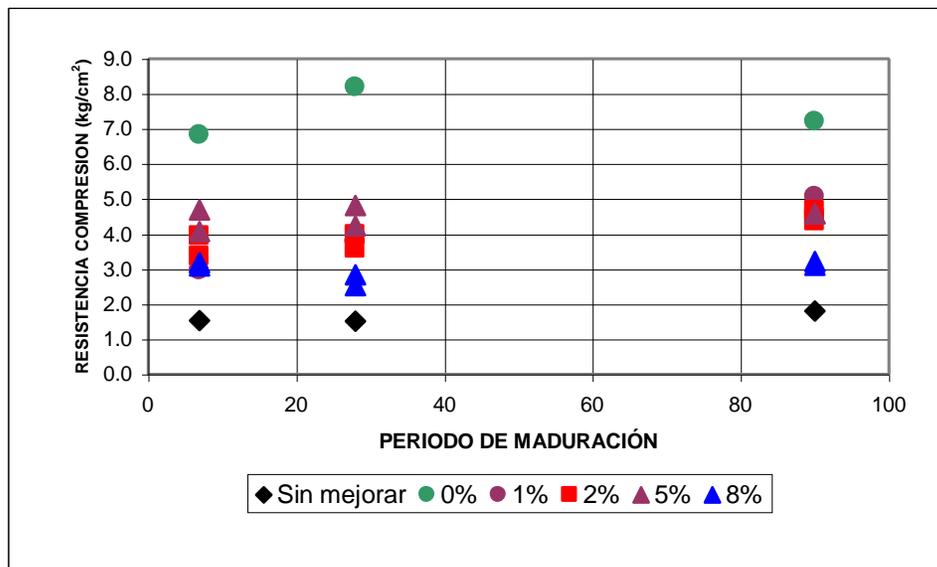
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
4% de cal	0% de dicloruro	6.82	8.19	7.20	3.21	4.63	2.14	35.19	35.72	35.20
	1% de dicloruro	3.25	3.77	4.63	3.56	3.56	3.56	43.90	44.87	43.74
	1% de dicloruro	2.95	3.77	5.06	3.56	3.56	3.21	43.39	44.06	43.37
	2% de dicloruro	3.94	3.97	4.66	3.56	3.56	3.92	43.48	43.64	43.36
	2% de dicloruro	3.35	3.58	4.35	2.85	3.56	3.21	43.19	43.63	44.18
	5% de dicloruro	4.69	4.80	4.58	4.27	4.27	3.56	40.44	41.78	42.00
	5% de dicloruro	4.07	4.23	4.58	3.56	4.99	3.92	42.04	43.03	42.10
	8% de dicloruro	3.09	2.52	3.21	6.41	4.99	7.12	44.15	44.04	43.26
	8% de dicloruro	3.17	2.83	3.10	7.12	7.12	7.12	43.66	44.55	43.54

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada.**

En la ilustración 128 se muestra el efecto de la dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 128. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada del suelo 2 con 4% de cal

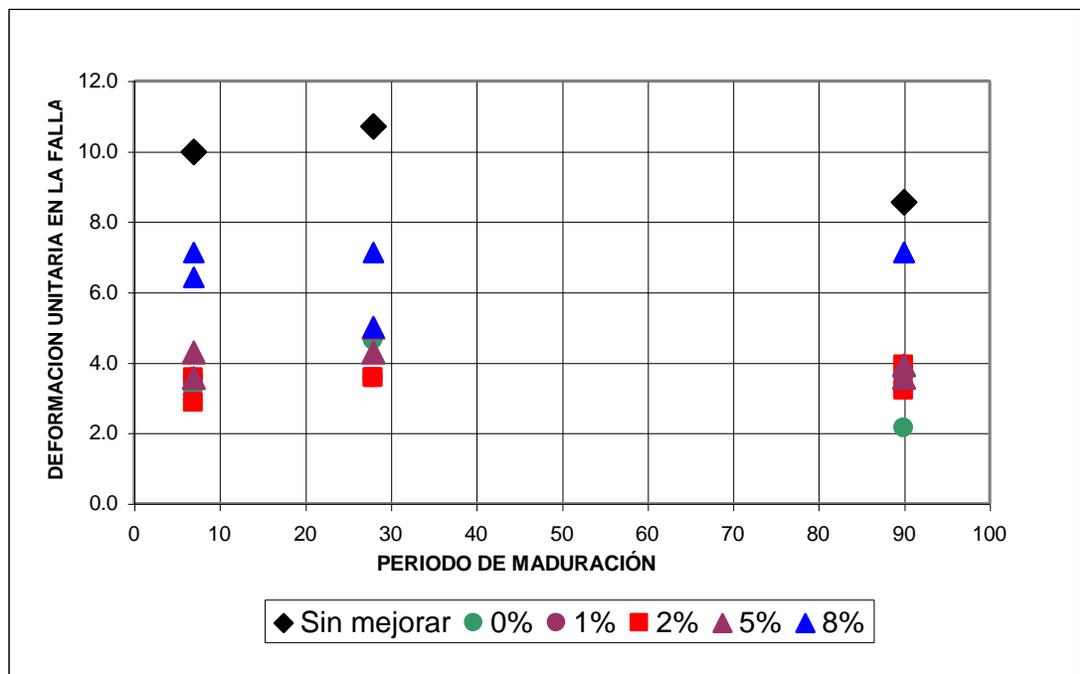


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro provoca una disminución considerable en la resistencia del suelo-cal, aunque es mayor que la del suelo sin mejorar.
 - ✓ Entre mayor es la cantidad de dicloruro adicionada mayor es la disminución de la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ No se observan cambios notorios de la resistencia con respecto al periodo de maduración.
- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 129 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 129. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de cantidades de dicloruro del 8% permiten incrementar considerablemente la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

- ✓ En la medida que se incrementa la cantidad de dicloruro aumenta la deformación unitaria en la falla.
- ✓ El periodo de maduración no tiene efectos sobre la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

✓ **Suelo 4 con 2% de cal**

En la tabla 52 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 52. Efecto de la adición del dicloruro de sodio del suelo 4 con 2% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
2% de cal	0% de dicloruro	1.46	1.49	1.34	7.84	8.55	4.99	42.02	ND	41.32
	1% de dicloruro	2.43	2.43	3.04	4.27	2.85	3.56	43.98	44.44	42.90
	1% de dicloruro	2.46	2.84	3.06	4.27	3.56	4.27	43.51	44.24	43.25
	2% de dicloruro	2.84	2.68	3.05	3.56	2.85	3.56	42.97	44.79	42.66
	2% de dicloruro	2.94	2.59	3.01	4.99	3.56	4.27	43.01	43.92	42.93
	5% de dicloruro	2.95	3.18	2.74	3.56	3.21	3.56	41.69	42.74	41.69
	5% de dicloruro	3.11	2.82	3.05	3.92	3.56	3.56	42.00	42.73	41.68
	8% de dicloruro	2.73	3.20	2.94	2.85	3.38	3.56	40.69	41.59	40.40
	8% de dicloruro	2.95	3.26	2.86	3.56	3.56	2.85	40.81	41.42	40.40

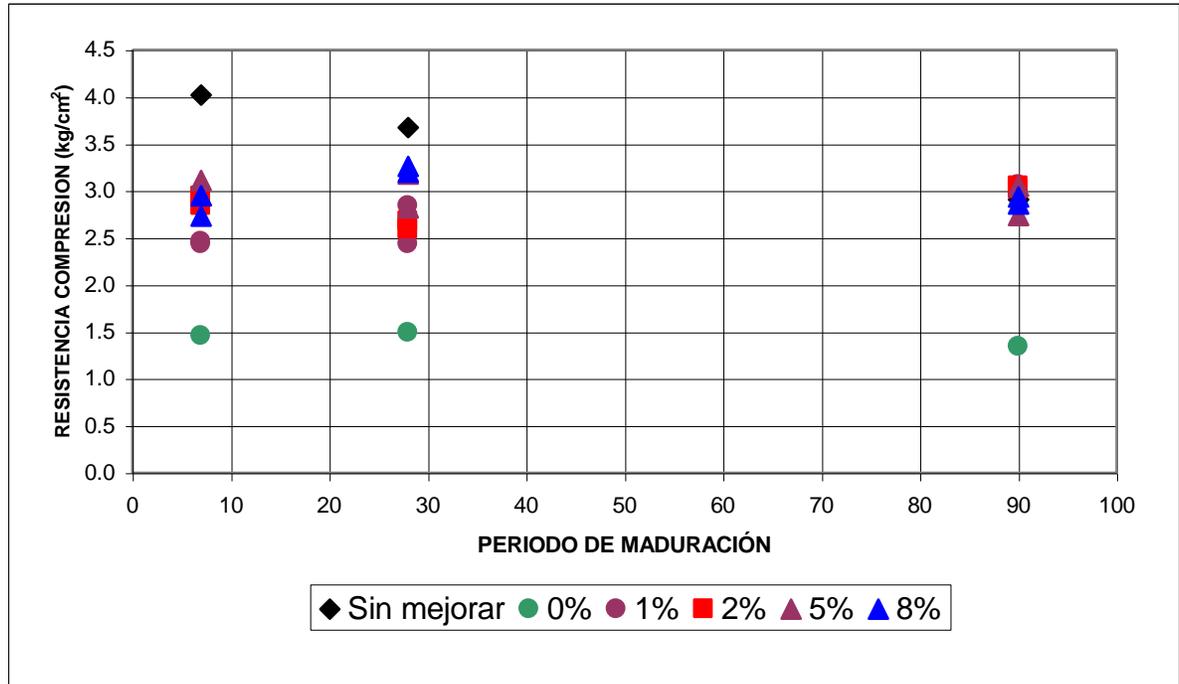
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 130 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 130. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 2% de cal

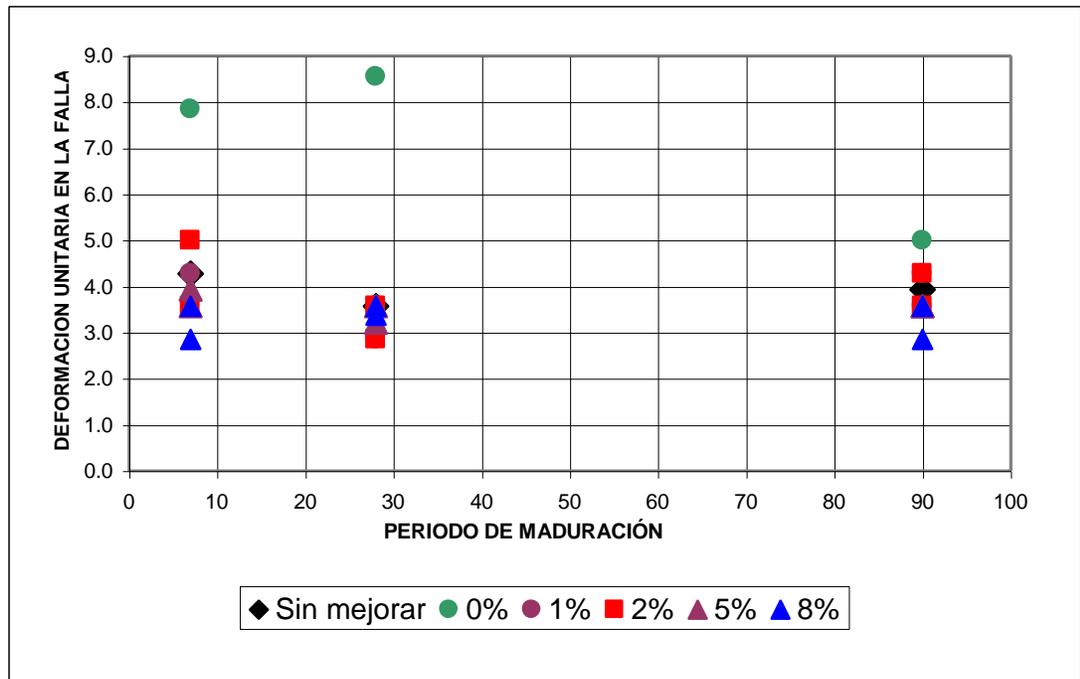


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro de sodio produce un incremento en la resistencia del suelo-cal.
- ✓ No se observan efectos considerables del periodo de maduración sobre la resistencia del suelo.
- ✓ El suelo solo se comporta mejor
- **Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 131 se muestra el efecto de la dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 131. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del dicloruro de sodio produce una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo cal, vuelve más rígido el suelo.
- ✓ El periodo de maduración no afecta considerablemente la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ La cantidad de dicloruro adicionada no afecta la disminución de la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

✓ **Suelo 4 con 4% de cal**

En la tabla 53 se presentan los resultados del análisis del efecto del dicloruro de sodio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 53. Efecto de la adición del dicloruro de sodio del suelo 4 con 4% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
4% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	0% de dicloruro	3.12	3.22	1.91	3.56	2.85	1.78	41.74	ND	40.48
	1% de dicloruro	3.92	3.53	3.95	3.21	2.14	3.56	44.52	45.01	44.02
	1% de dicloruro	3.47	3.57	3.62	2.85	2.85	2.85	44.30	45.92	43.99
	2% de dicloruro	3.64	3.80	4.07	2.85	2.85	2.85	44.31	44.56	43.05
	2% de dicloruro	3.37	4.17	4.35	2.85	3.21	3.21	44.24	44.26	43.31
	5% de dicloruro	3.44	4.06	3.67	2.85	2.49	2.85	44.27	43.51	42.42
	5% de dicloruro	2.97	3.50	3.80	2.85	2.85	2.85	42.86	44.29	42.65
	8% de dicloruro	3.35	3.48	3.42	3.56	2.14	2.49	43.26	42.53	41.63
	8% de dicloruro	2.86	3.45	3.21	2.85	2.85	3.21	41.39	42.30	41.54

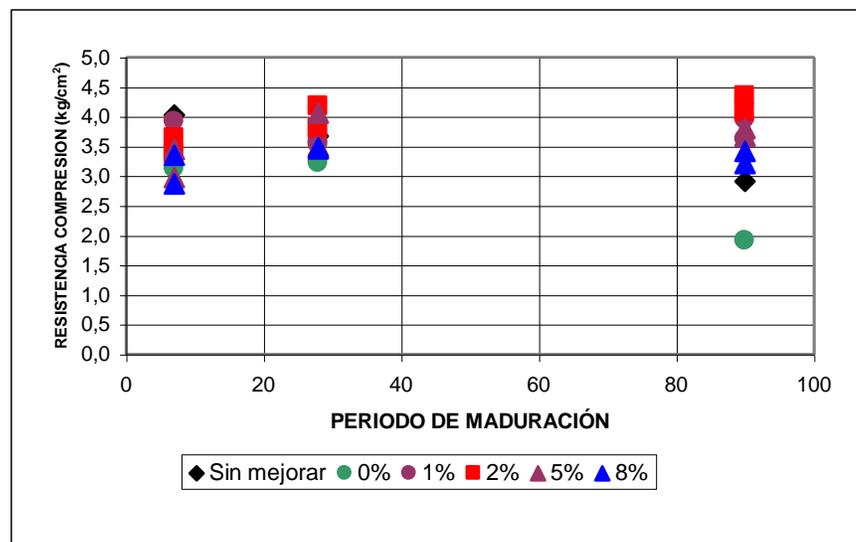
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 132 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 132. Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4 con 4% de cal

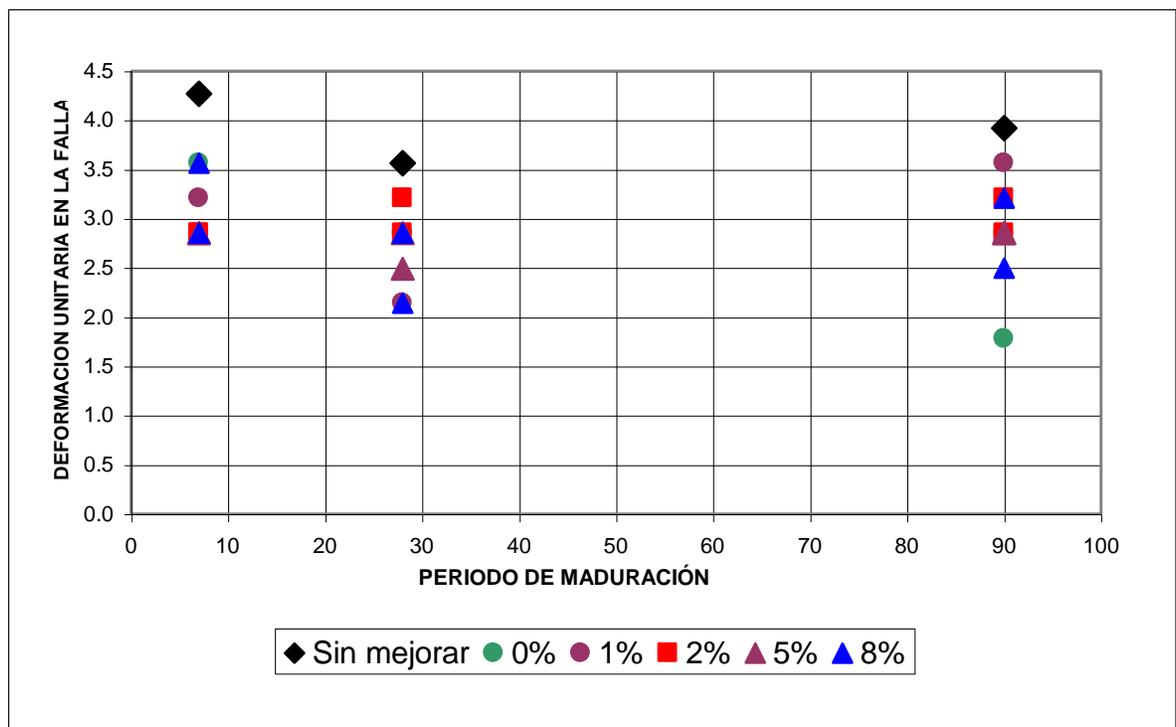


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro permite obtener un pequeño incremento en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para contenidos de dicloruro de sodio del 5% o menor entre mayor es la cantidad de dicloruro adicionada menor es la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para porcentajes de dicloruro superiores al 5% la resistencia del suelo - Cal disminuye.
 - ✓ El periodo de maduración no tiene efectos significativos sobre la resistencia del suelo-cal. Pero si se aprecia que para el 1% y 2% mejora la resistencia con el periodo de maduración.
- **Efecto del porcentaje del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 133 se muestra el efecto del dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 133 Efecto del porcentaje de dicloruro de sodio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de dicloruro de sodio produce un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo después de los 90 días de curado.
- ✓ Hasta cantidades del 2% de dicloruro la deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que se incrementa el dicloruro.
- ✓ Para cantidades de dicloruro superiores al 2% la deformación unitaria en la falla empieza a disminuir en la medida que se incrementa la cantidad de dicloruro.

5.3. ANALISIS DEL EFECTO DEL SILICATO DE CALCIO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS-CAL

5.3.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo-cal se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento setenta y cuatro (174) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 y 4, porcentajes del 2, 3 y 4% de cal y porcentajes de silicato de calcio del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briketa.

5.3.2. Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cal

En la tabla 54 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 54. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 2 con 2% de cal

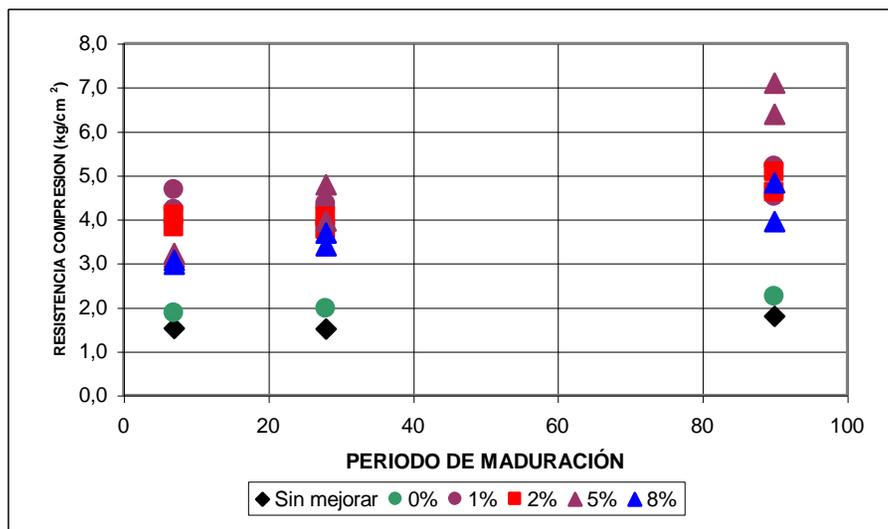
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
2% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
	0% de Silicato	1.86	1.96	2.24	4.99	7.12	5.70	35.67	36.70	34.69
	1% de Silicato	4.21	4.26	4.51	2.85	2.49	2.85	33.74	33.56	32.18
	1% de Silicato	4.66	4.35	5.20	2.85	2.85	3.92	33.19	34.05	32.28
	2% de Silicato	4.08	3.75	5.07	3.21	2.49	3.21	33.00	33.12	31.99
	2% de Silicato	3.82	4.05	4.61	2.85	2.85	3.21	33.16	33.41	32.86
	5% de Silicato	3.23	4.77	6.39	3.21	3.56	3.21	35.03	34.53	32.17
	5% de Silicato	3.13	3.95	7.09	3.21	3.21	3.92	35.06	35.25	31.96
	8% de Silicato	3.06	3.39	3.94	2.85	2.85	3.21	32.85	34.02	32.99
	8% de Silicato	2.97	3.69	4.82	2.85	2.85	3.21	32.88	33.31	32.50

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada.**

En la ilustración 134 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 134. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada del suelo 2 con 2% de cal

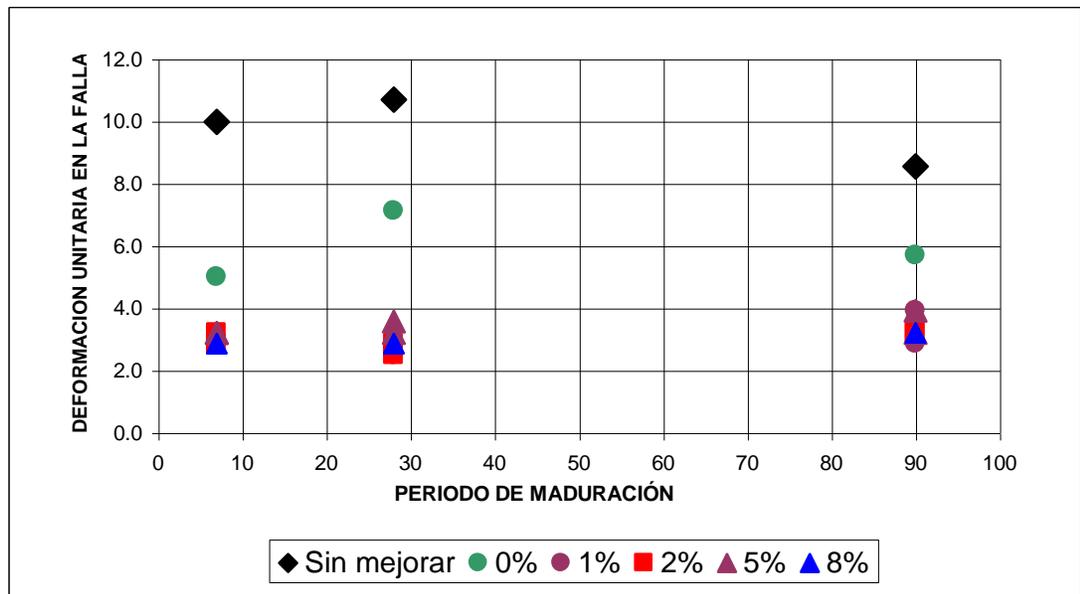


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del silicato de calcio produce incrementos en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para cantidades de silicato del 5% o menos la resistencia del suelo-cal aumenta en la medida que se incrementa la cantidad de silicato.
 - ✓ Para cantidades de silicatos superiores al 5% la resistencia del suelo-cal disminuye en la medida que aumenta la cantidad de silicato.
 - ✓ Entre mayor es el periodo de maduración mayor es el incremento de la resistencia del suelo-cal.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 135 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 135. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del silicato provoca una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

- ✓ El periodo de curado no afecta la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ La cantidad de silicato no afecta la deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 2 con 3% de cal**

En la tabla 55 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 55. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 2 con 3% de cal

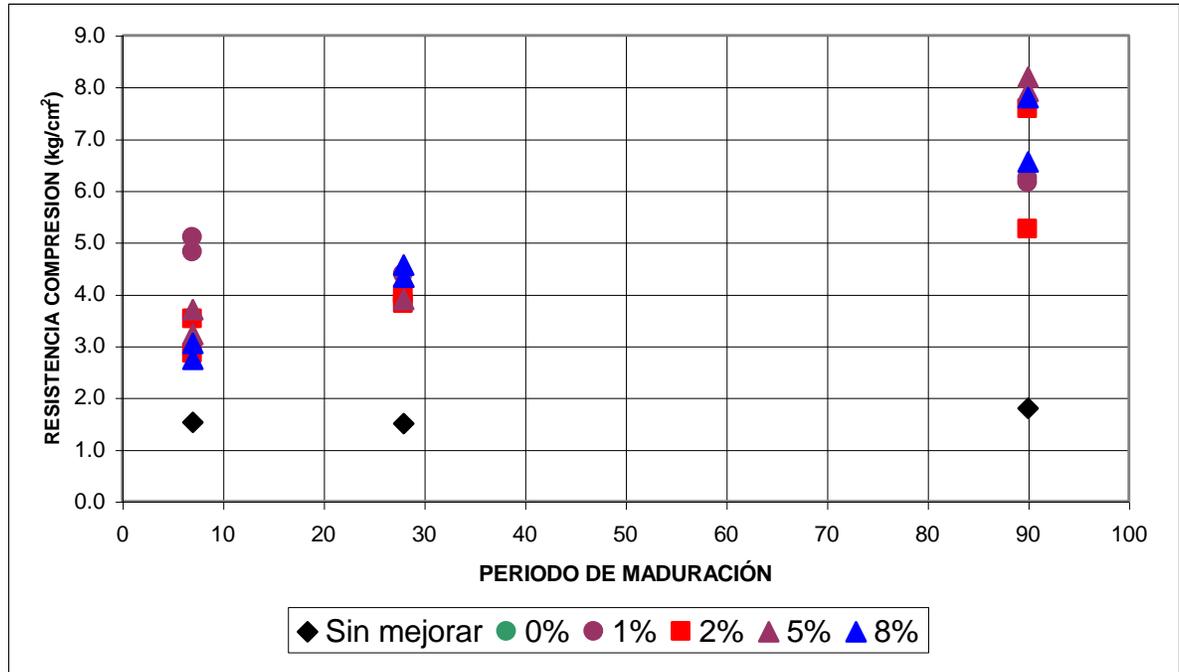
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
3% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
	1% de Silicato	4.81	3.87	6.14	2.49	3.56	3.21	34.78	32.92	32.25
	1% de Silicato	5.09	4.37	6.23	2.85	2.14	2.85	34.51	34.17	31.84
	2% de Silicato	3.51	3.98	5.25	3.56	2.85	3.56	35.60	34.50	33.87
	2% de Silicato	2.85	3.81	7.57	3.21	2.85	3.92	36.13	34.57	32.38
	5% de Silicato	3.70	3.90	8.19	3.21	2.85	3.38	35.36	34.40	28.88
	5% de Silicato	3.22	4.33	7.92	2.85	2.85	3.56	36.02	34.53	31.72
	8% de Silicato	2.74	4.32	6.55	2.85	2.85	3.92	35.76	34.00	30.16
	8% de Silicato	3.05	4.56	7.80	4.27	2.85	3.92	35.41	32.73	30.88

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 136 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 136. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 2 con 3% de cal



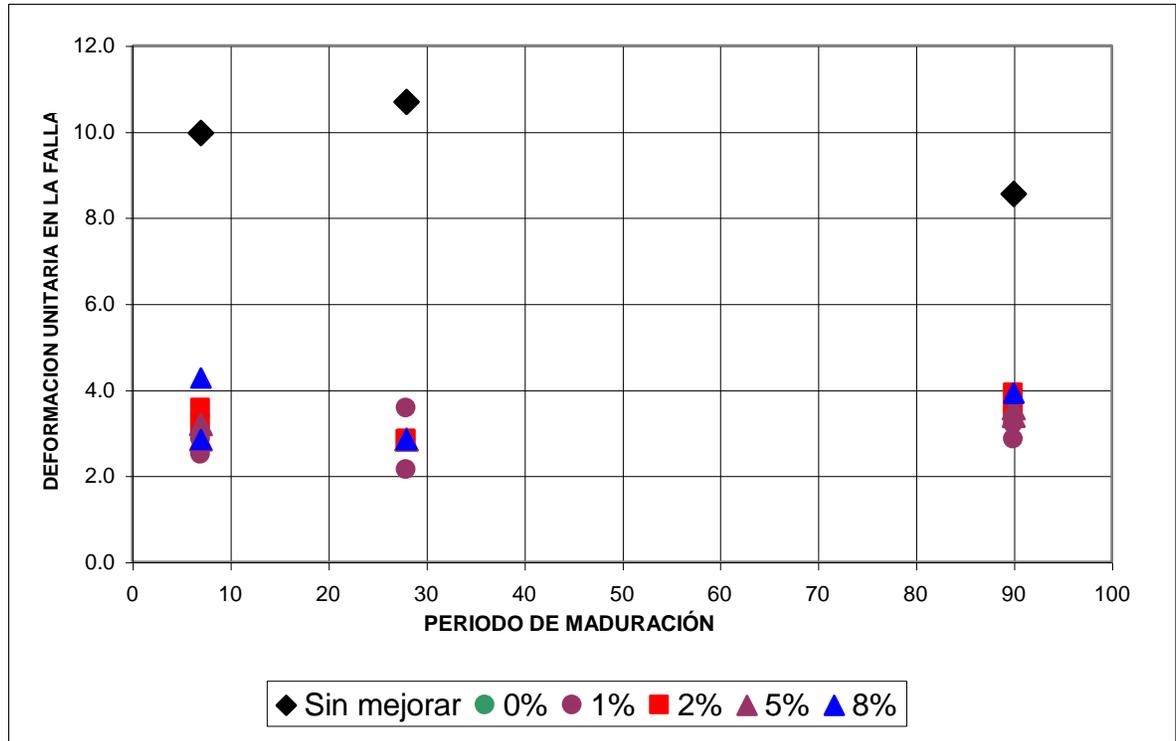
Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La resistencia se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
- ✓ La variación de la cantidad de silicato no es significativa en el incremento de la resistencia. Pero la adición del 1% de silicato produce un gran incremento inicial en el suelo cal.

➤ **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 137 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 137. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 3% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato provoca una disminución en la deformación unitaria del suelo.
 - ✓ La variación de la cantidad de silicato no es significativa en la disminución de la deformación unitaria en la falla.
 - ✓ No se observan efectos del curado en la deformación unitaria en la falla.
- ✓ **Suelo 2 con 4% de cal**

En la tabla 56 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 56. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 2 con 4% de cal

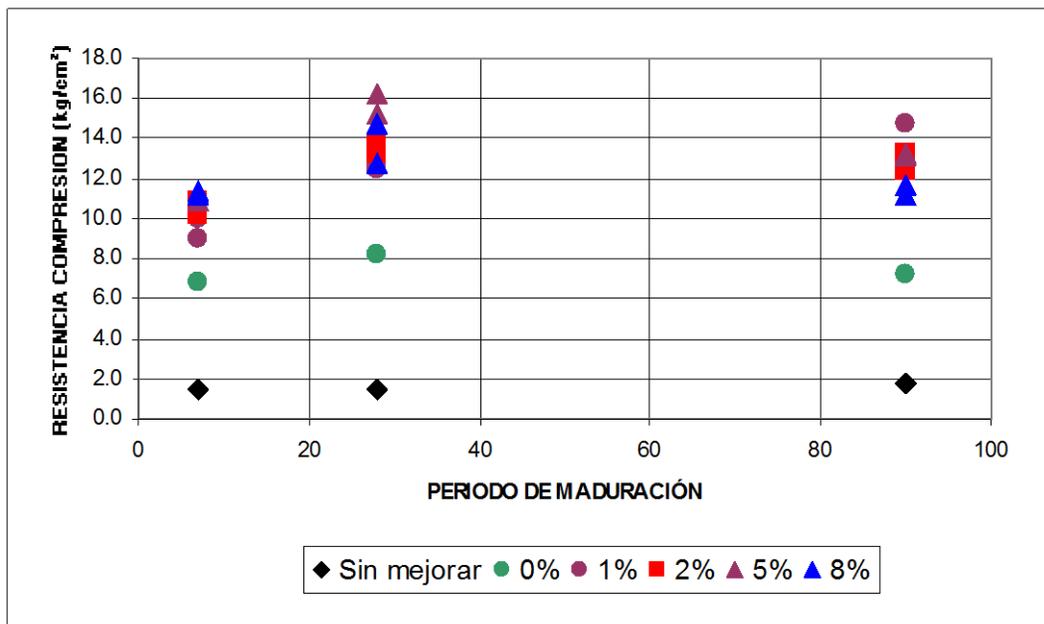
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
4% de cal	0% de Silicato	6.82	8.19	7.20	3.21	4.63	2.14	35.19	35.72	35.20
	1% de Silicato	9.03	12.48	14.71	6.06	5.70	2.85	32.43	32.53	32.46
	1% de Silicato	9.95	12.77	12.70	5.70	6.06	2.14	32.36	33.59	32.49
	2% de Silicato	10.91	13.21	13.23	5.70	6.41	2.14	33.43	33.63	33.00
	2% de Silicato	10.14	13.71	12.38	5.34	3.21	2.14	33.54	33.09	33.19
	5% de Silicato	10.91	15.23	13.23	4.99	2.85	2.14	33.18	32.08	31.25
	5% de Silicato	11.24	16.24	13.13	4.27	2.49	2.85	35.36	31.62	30.98
	8% de Silicato	11.35	14.76	11.68	3.56	2.49	1.78	31.52	30.43	29.85
	8% de Silicato	11.22	12.81	11.15	4.27	2.14	1.78	31.64	31.17	30.05

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 138 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 138. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada de suelo 2 con 4% de cal

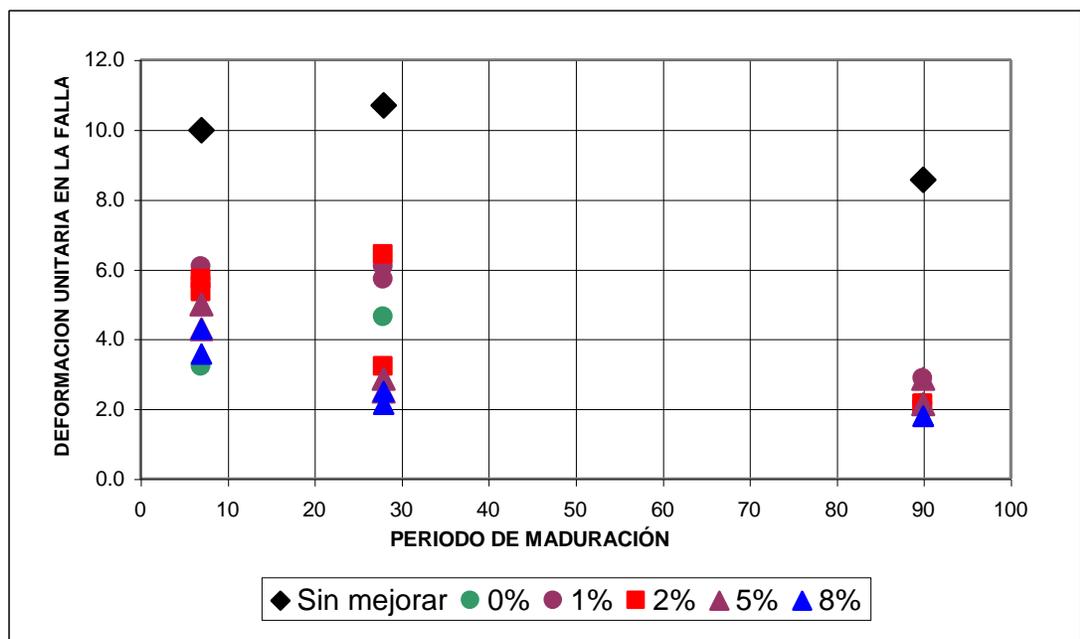


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato permite obtener un incremento en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para un 1% de silicato la resistencia se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ Para porcentajes superiores al 1% se observa que después de los 28 días la resistencia empieza a disminuir.
 - ✓ La cantidad de silicato no afecta de manera significativa el incremento en la resistencia del suelo-cal.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 139 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 139. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato provoca incremento inicial en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ Para un periodo de maduración de 90 días el efecto del silicato en la deformación unitaria no es significativo.
- ✓ La deformación unitaria disminuye en la medida que se incrementa el contenido de silicato.
- ✓ La deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que se incrementa el periodo de maduración.

✓ **Suelo 4 con 2% de cal**

En la tabla 57 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 57. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 4 con 2% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
2% de cal	0% de Silicato	1.46	1.49	1.34	7.84	8.55	4.99	42.02	ND	41.32
	1% de Silicato	3.14	3.54	2.61	7.12	7.84	6.41	43.22	41.74	42.39
	1% de Silicato	2.99	2.95	3.57	7.12	7.84	7.84	43.42	42.63	42.14
	2% de Silicato	3.12	3.04	4.04	4.99	4.99	4.99	42.03	41.28	40.31
	2% de Silicato	3.30	3.43	3.58	6.41	4.99	4.27	41.87	40.65	40.83
	5% de Silicato	2.88	2.26	2.62	4.99	4.99	4.27	42.38	42.01	41.93
	5% de Silicato	2.21	2.46	3.26	4.27	4.99	4.27	42.55	42.09	41.19
	8% de Silicato	3.16	2.84	4.73	2.85	2.85	2.14	40.67	39.31	39.42
	8% de Silicato	3.41	2.48	4.40	3.56	2.85	2.85	40.83	39.92	38.58

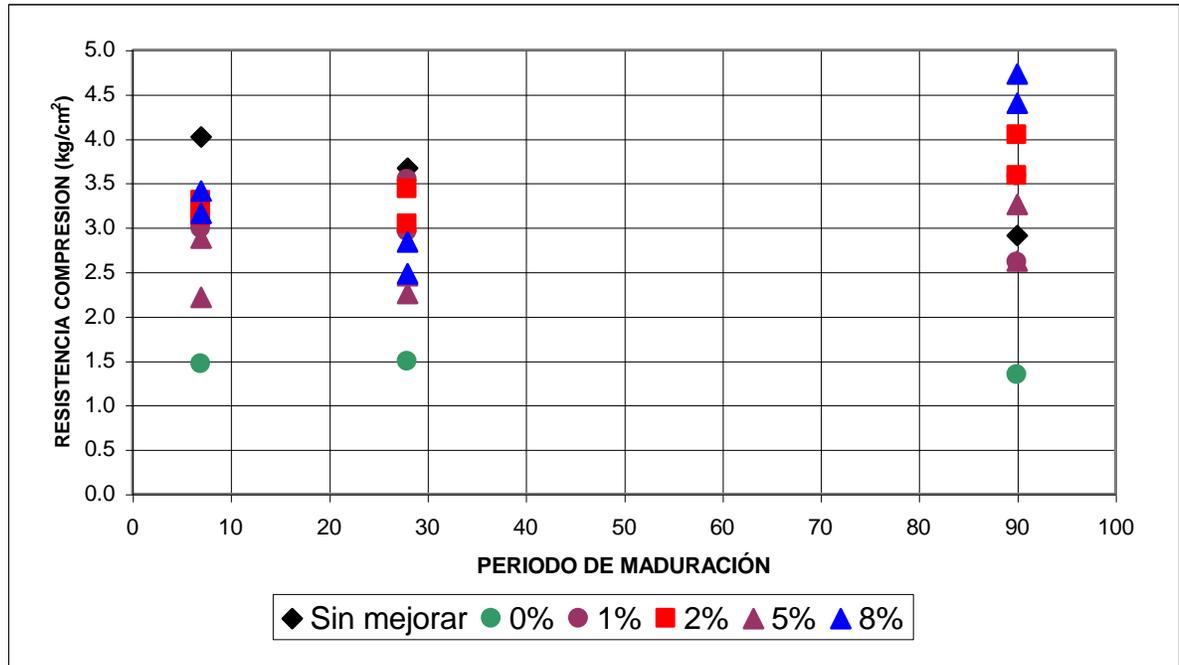
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 140 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 140. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 4 con 2% de cal

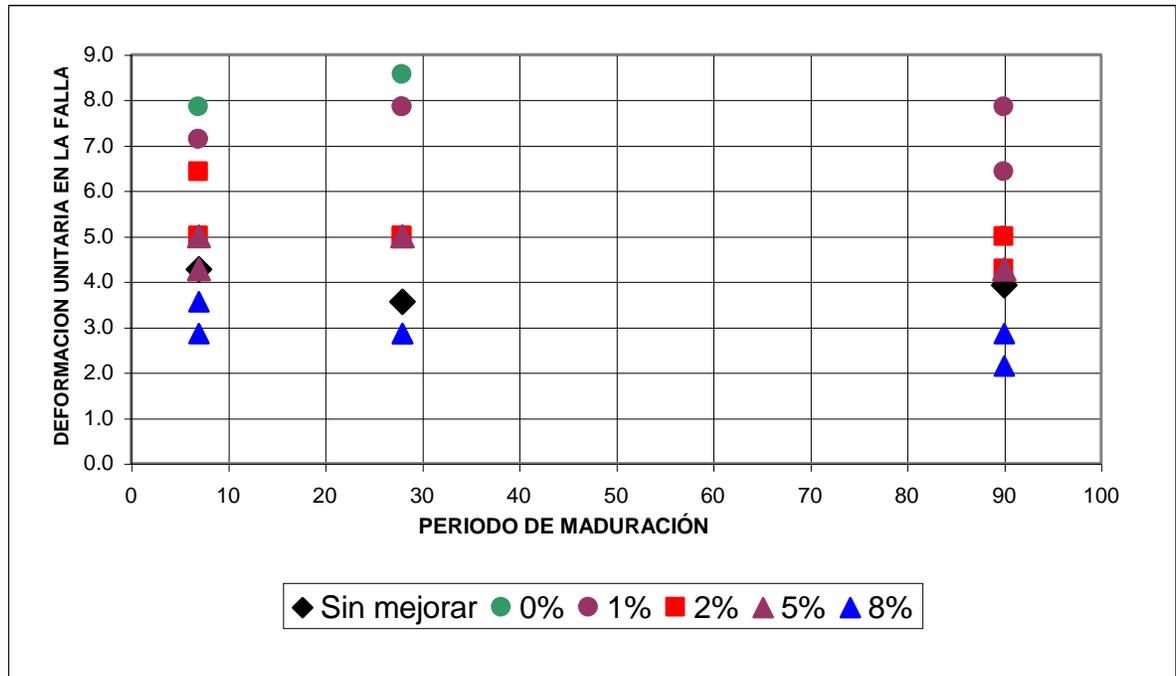


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce un incremento en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ En la medida que aumenta el periodo de maduración se incrementa la resistencia de la mezcla.
 - ✓ A los 90 días se observa una mejora en la resistencia del suelo solo con la adición de cal y silicato
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 141 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 141. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ Entre mayor es la cantidad de silicato adicionada mayor es la disminución de la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ No se observan efectos del periodo de curado en la resistencia del suelo.

✓ **Suelo 4 con 3% de cal**

En la tabla 58 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 58. Efecto de la adición del silicato de calcio del suelo 4 con 3% de cal

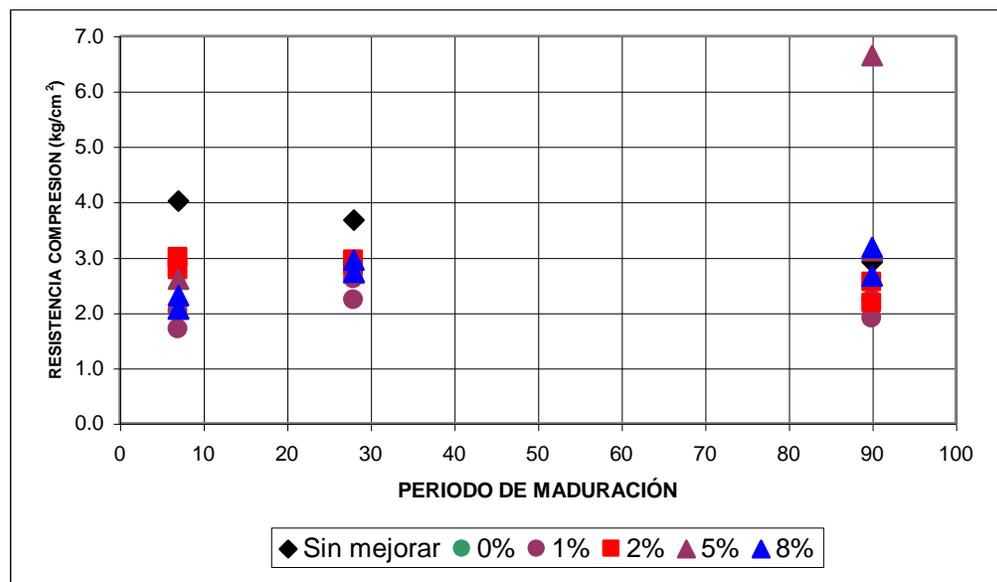
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
3% de Cal	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	1% de Silicato	1.70	2.23	2.23	4.99	4.99	4.99	42.18	44.64	44.61
	1% de Silicato	2.02	2.60	1.89	6.41	8.55	5.70	43.45	45.99	45.26
	2% de Silicato	2.99	2.83	2.16	2.85	2.14	2.14	40.95	40.93	41.61
	2% de Silicato	2.76	2.95	2.55	3.56	2.85	2.14	41.01	41.04	41.71
	5% de Silicato	2.61	2.72	3.12	4.27	2.85	3.56	42.67	43.19	43.01
	5% de Silicato	2.07	2.72	6.64	3.56	2.85	3.56	42.67	43.19	40.17
	8% de Silicato	2.31	2.95	2.66	2.85	2.85	3.56	42.62	43.03	43.34
	8% de Silicato	2.06	2.73	3.18	2.14	2.85	3.56	43.07	42.98	43.17

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 142 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 142. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada de suelo 4 con 3% de cal

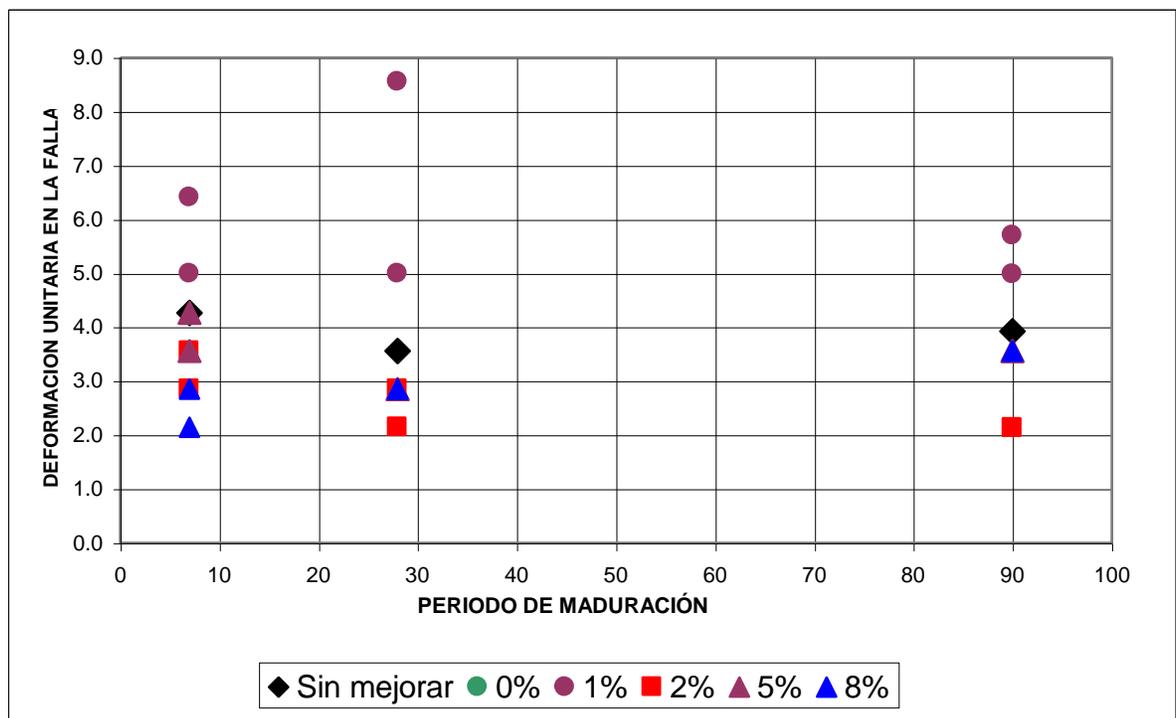


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce una disminución en la resistencia del suelo.
- ✓ No se observa variaciones significativas de la resistencia con el cambio del periodo de maduración.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 143 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 143. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 3% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ Cantidades de silicato del 1% producen un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

- ✓ Cantidades de silicato superiores al 1% producen una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo – cal.
- ✓ No se observan cambios significativos en la deformación unitaria en la falla del suelo con la variación del periodo de maduración.

✓ **Suelo 4 con 4% de cal**

En la tabla 59 se presentan los resultados del análisis del efecto del silicato de calcio en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 59. Efecto de la adición del silicato de calcio en el suelo 4 con 4% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
4% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	0% de Silicato	3.12	3.22	1.91	3.56	2.85	1.78	41.74	ND	40.48
	1% de Silicato	3.63	3.17	3.26	4.27	4.99	4.99	45.00	44.56	44.65
	1% de Silicato	3.73	2.99	3.14	7.12	4.99	4.27	45.10	44.96	44.50
	2% de Silicato	3.26	3.29	3.94	4.99	4.27	4.27	44.67	43.42	43.54
	2% de Silicato	3.17	3.42	4.38	3.56	4.27	4.27	44.25	43.61	42.41
	5% de Silicato	2.33	2.82	4.14	4.27	4.27	4.99	46.79	46.92	44.88
	5% de Silicato	2.43	2.30	3.67	4.27	3.56	4.99	46.99	47.75	45.23
	8% de Silicato	2.79	2.77	3.36	3.56	4.27	3.56	44.90	46.51	44.96
8% de Silicato	2.56	2.72	3.58	3.56	4.27	3.56	45.27	46.51	45.18	

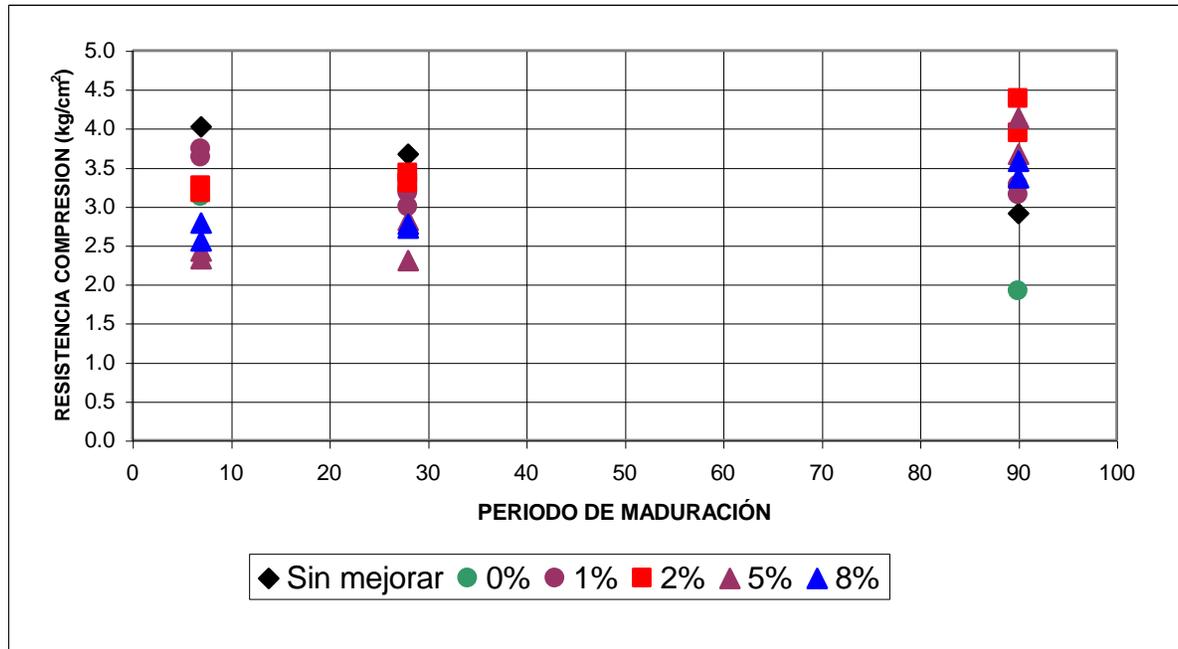
ND: No determinado

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión confinada.**

En la ilustración 144 se muestra el efecto del silicato de calcio en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 144. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 4 con 4% de cal

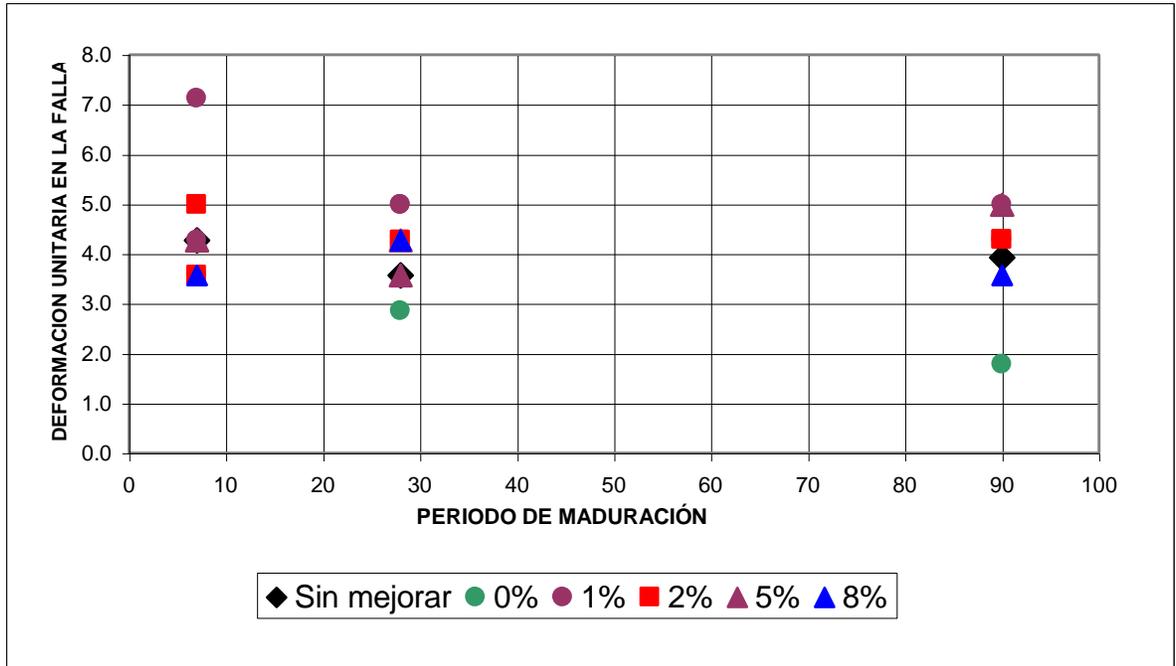


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce una disminución en la resistencia del suelo hasta los 28 días y a los 90 días hay un leve aumento con respecto al suelo – cal con 0% de silicato de calcio.
 - ✓ Para porcentajes de silicato del 1% se observa una disminución de la resistencia en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ Para porcentajes de silicato superiores al 1% se observa que la resistencia se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ Para porcentajes de silicato del 2% o menores la resistencia aumenta en la medida que se incrementa la cantidad de silicato, para un periodo de maduración de 90 días.
 - ✓ Para cantidades de silicato superiores al 2% la resistencia del suelo disminuye en la medida que se incrementa el contenido de silicato, para un periodo de maduración de 90 días.
- **Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 145 se muestra el efecto del silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 145. Efecto del porcentaje de silicato de calcio en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de silicato produce un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ No se observan cambios significativos en la deformación unitaria en la falla del suelo con la variación del periodo de maduración.

5.4. ANALISIS DEL EFECTO DEL TEXILÁN 553 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

5.4.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 y 4, porcentajes del 2 y 4% de cal y porcentajes de Texilán 553 del 1%, 2%, 5% y 8%.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briqueta.

5.4.2. Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cal

En la tabla 60 se presentan los resultados del análisis del efecto del Texilán 553 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 60. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 2 con 2% de cal

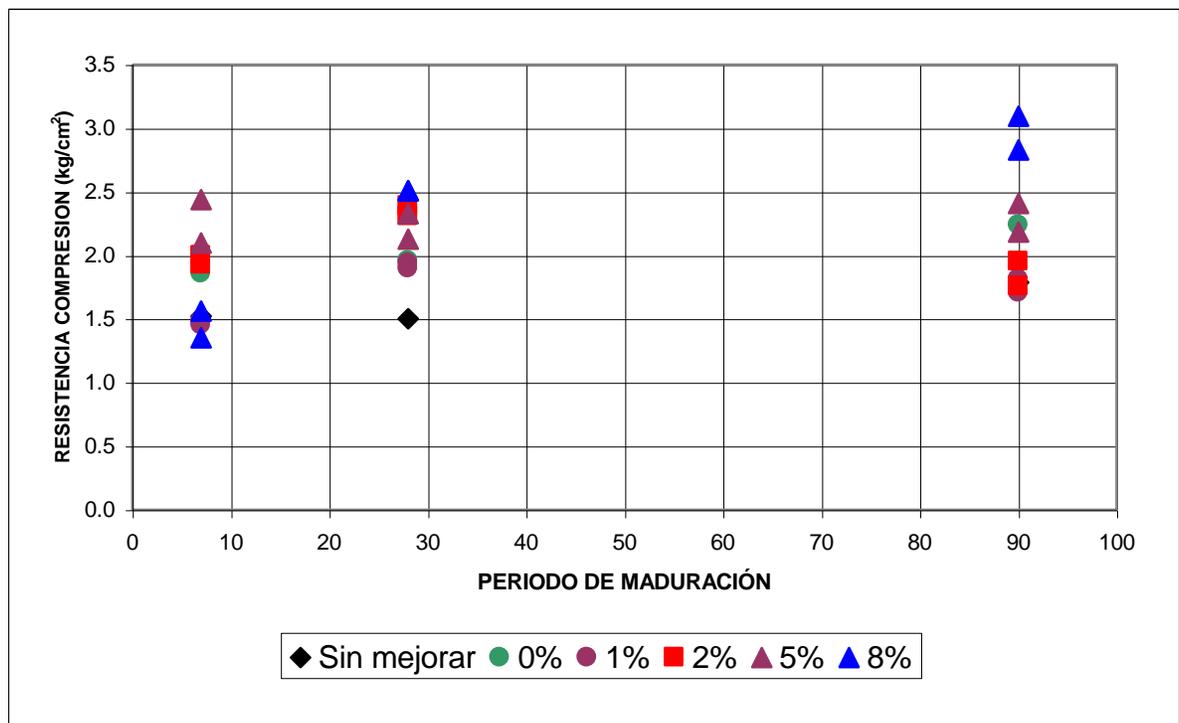
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
	Curado (días)									
	Sin mejorar	1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
2% de cal	0% de Texilán	1.86	1.96	2.24	4.99	7.12	5.70	35.67	36.70	34.69
	1% de Texilán	1.48	1.94	1.71	6.41	7.12	7.12	41.62	41.46	41.35
	1% de Texilán	1.45	1.90	1.81	4.99	7.12	6.41	41.89	41.93	41.02
	2% de Texilán	1.93	2.39	1.95	4.63	6.41	4.27	40.13	39.75	39.91
	2% de Texilán	2.00	2.31	1.76	4.99	6.41	4.27	40.38	40.23	40.00
	5% de Texilán	2.10	2.33	2.41	4.99	5.70	4.99	40.41	40.44	39.05
	5% de Texilán	2.44	2.13	2.18	5.70	4.99	4.27	39.90	40.22	39.39
	8% de Texilán	1.56	2.51	3.09	3.56	4.99	4.27	41.61	40.60	40.89
	8% de Texilán	1.35	2.51	2.83	3.56	4.99	5.70	41.66	40.49	40.93

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje del texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 146 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 146. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2 con 2% de cal

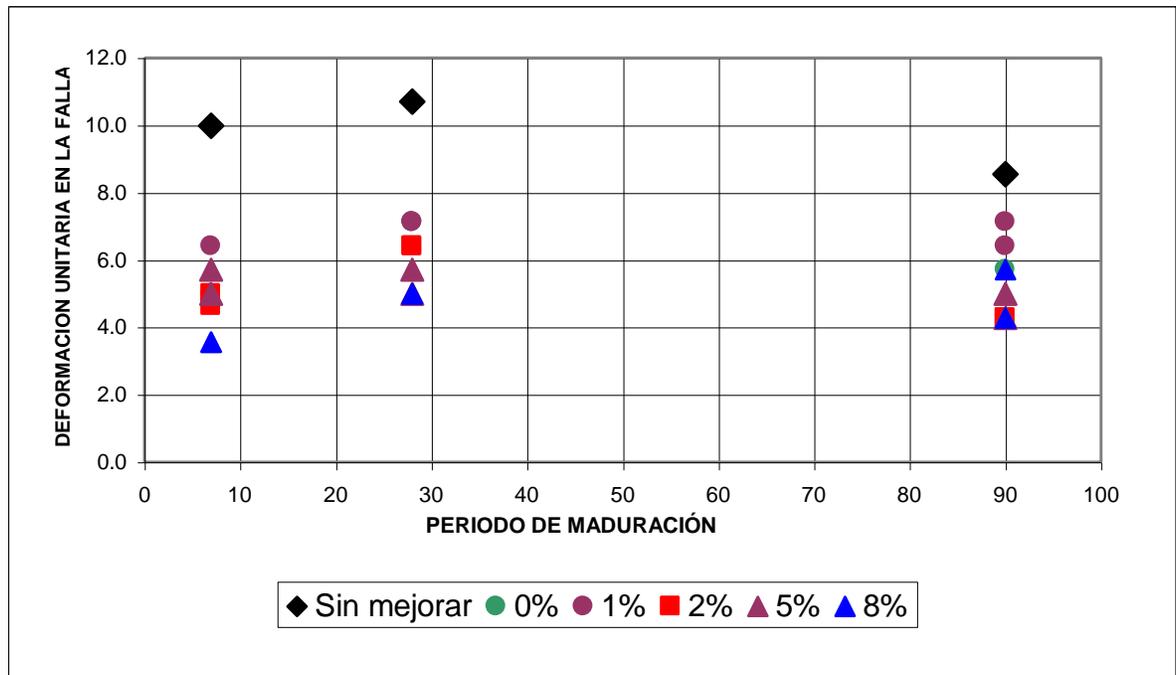


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del 5 y 8% de Texilán 553 produce un incremento en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Cantidades de Texilán 553 menores al 5% producen una disminución en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para cantidades de texilán del 8% en la medida que se incrementa el periodo de maduración aumenta la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para cantidades de texilán menores al 8% el periodo de maduración no tiene efectos significativos en la resistencia del suelo-cal.
- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 147 se muestra el efecto del texilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 147. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del Texilán 553 no produce efectos significativos sobre la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ **Suelo 2 con 4% de cal**

En la tabla 61 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 61. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 2 con 4% de cal

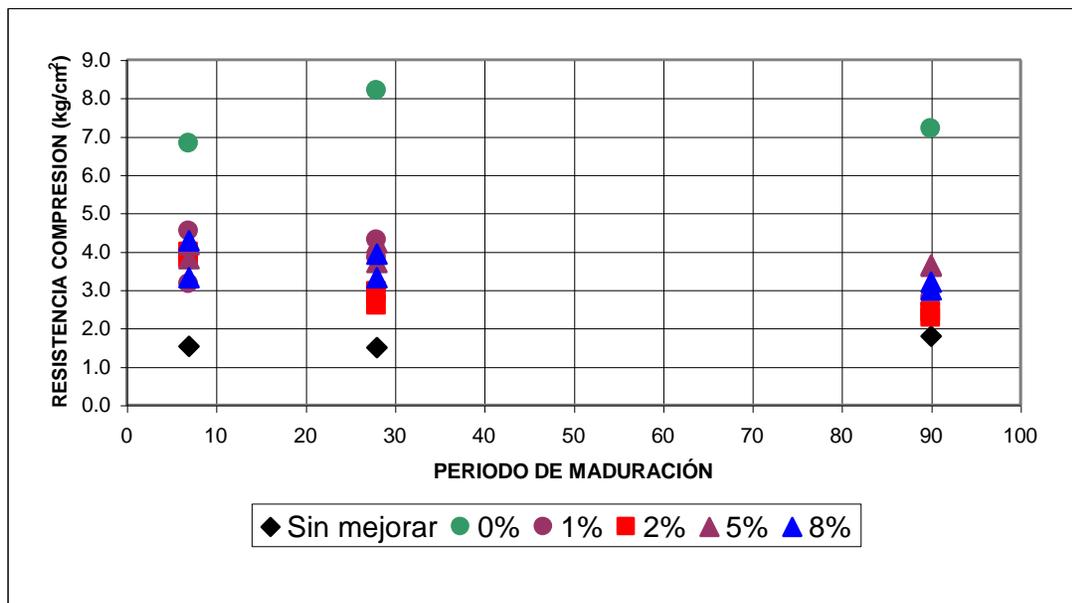
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
4% de cal	0% de Texilán	6.82	8.19	7.20	3.21	4.63	2.14	35.19	35.72	35.20
	1% de Texilán	4.53	4.30	2.60	2.85	2.85	2.85	38.13	37.71	37.20
	1% de Texilán	3.15	3.82	2.79	2.49	3.56	3.56	39.44	38.22	37.16
	2% de Texilán	3.82	2.58	2.40	3.21	2.85	2.85	38.04	37.58	38.11
	2% de Texilán	3.98	2.95	2.27	3.21	3.56	2.85	37.31	38.43	37.53
	5% de Texilán	4.18	3.71	3.62	2.85	3.56	2.85	39.62	39.58	36.76
	5% de Texilán	3.82	4.23	3.64	2.85	2.85	2.85	39.00	39.28	36.33
	8% de Texilán	3.32	3.31	3.20	2.85	2.14	2.14	39.72	39.45	36.92
	8% de Texilán	4.28	3.93	3.00	3.56	2.85	2.14	39.41	39.76	36.69

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 148 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 148. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 2 con 4% de cal

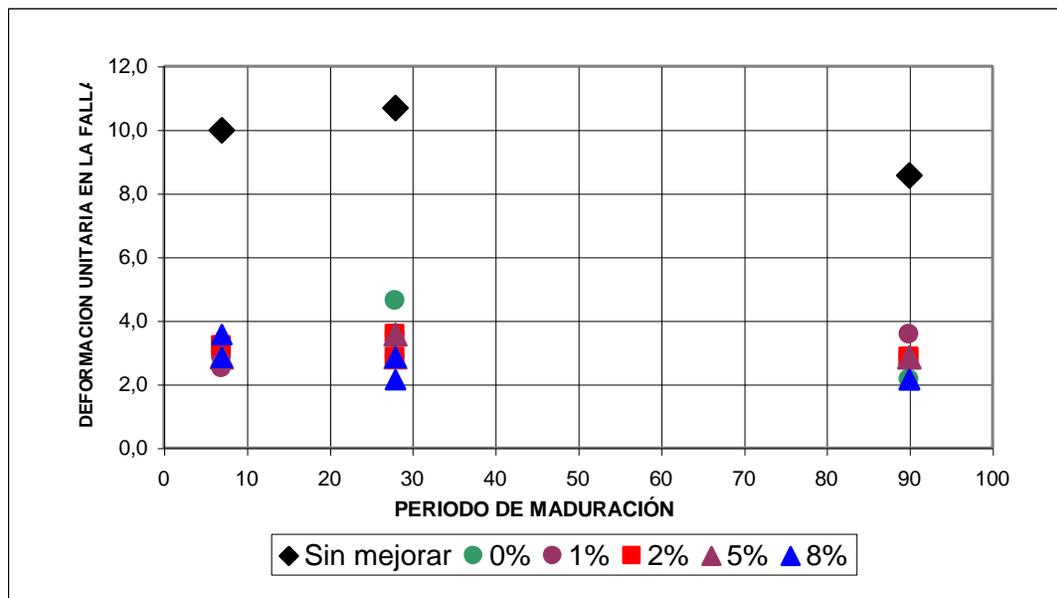


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de texilán produce una disminución en la resistencia del suelo – cal.
- ✓ El incremento del periodo de maduración produce una reducción en la resistencia del suelo–cal.
- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 149 se muestra el efecto del texilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 149. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observan efectos significativos de la adición de texilán 553 en la deformación unitaria del suelo–cal.
- ✓ No se observa efecto del periodo de maduración en la deformación del suelo.

✓ **Suelo 4 con 2% de cal**

En la tabla 62 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 62. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 4 con 2% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
2 de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	0% de Texilán	1.46	1.49	1.34	7.84	8.55	4.99	42.02	ND	41.32
	1% de Texilán	2.21	1.80	1.81	7.12	8.55	7.84	42.66	42.76	42.06
	1% de Texilán	2.24	1.88	1.79	7.12	7.84	7.12	42.24	42.56	41.67
	2% de Texilán	2.04	2.57	2.76	4.99	5.70	4.99	38.98	40.58	39.88
	2% de Texilán	2.20	2.10	2.93	4.99	4.27	4.99	38.55	41.11	39.59
	5% de Texilán	1.99	2.36	2.47	4.27	4.27	4.27	41.11	42.30	41.21
	5% de Texilán	2.21	2.57	2.48	4.99	4.99	4.99	41.83	41.94	41.27
	8% de Texilán	1.70	1.97	2.08	5.70	5.70	4.99	42.70	43.00	42.10
8% de Texilán	1.81	2.17	2.26	6.41	5.70	4.27	42.88	43.31	41.73	

ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

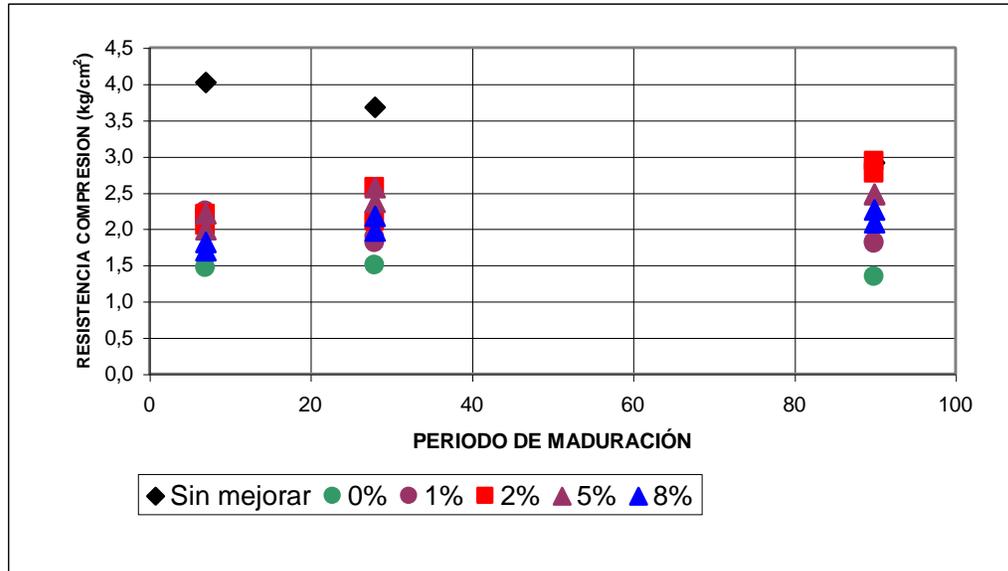
➤ **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 150 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Del análisis de los resultados presentados en la ilustración 150 se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición del texilán 553 genera un incremento en la resistencia del suelo.
- ✓ Con la adición de texilán en la medida que aumenta el periodo de maduración se incrementa la resistencia del suelo-cal.
- ✓ Para cantidades de texilán del 2% o menores la resistencia aumenta en la medida que se incrementa la cantidad de texilán.
- ✓ Para cantidades de texilán superiores al 2% la resistencia disminuye en la medida que aumenta la cantidad de texilán.

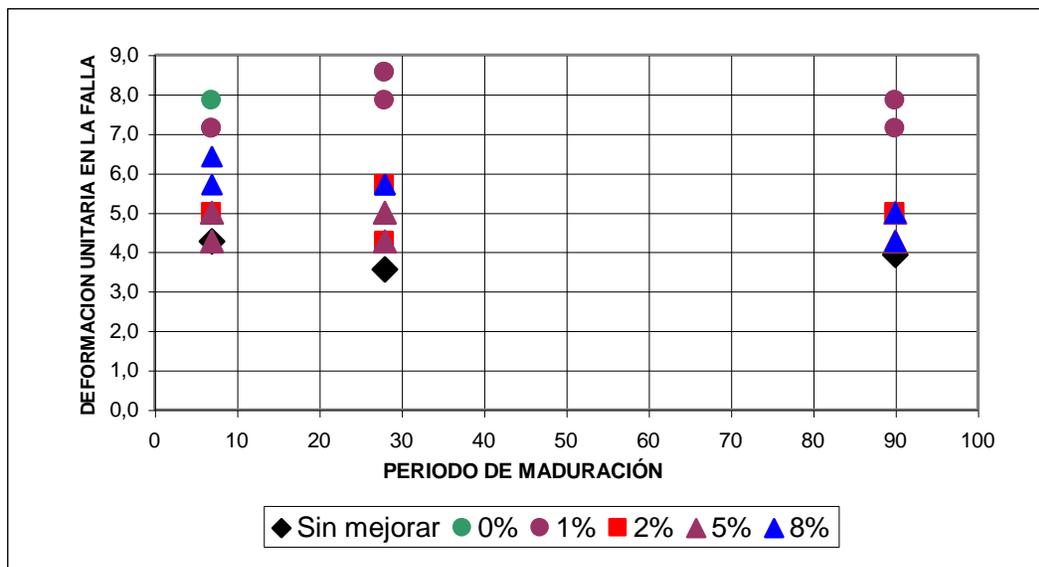
Ilustración 150. Efecto del % textilán 553 en la resistencia a la compresión inconfínada de suelo 4 con 2% de cal



➤ **Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 151 se muestra el efecto del textilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 151. Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de texilán produce una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ Para cantidades de texilán superiores al 1% la deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que aumenta el periodo de maduración.
- ✓ Para cantidades de texilán del 1% el periodo de maduración no tiene efectos sobre la deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 4 con 4% de cal**

En la tabla 63 se presentan los resultados del análisis del efecto del texilán 553 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 63. Efecto de la adición del texilán 553 en el suelo 4 con 4% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
4% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	0% de Texilán	3.12	3.22	1.91	3.56	2.85	1.78	41.74	ND	40.48
	1% de Texilán	3.12	2.32	2.28	3.56	2.49	2.14	41.10	44.22	41.52
	1% de Texilán	2.76	2.58	3.24	2.85	2.14	2.85	41.61	43.36	40.05
	2% de Texilán	2.21	2.87	3.16	3.56	3.56	2.85	44.27	44.03	41.73
	2% de Texilán	2.83	2.45	3.03	2.85	2.85	2.85	43.38	43.02	42.10
	5% de Texilán	2.76	2.92	2.81	3.56	3.56	3.56	43.66	43.73	43.02
	5% de Texilán	3.19	2.82	2.80	4.27	3.56	3.56	43.18	43.81	43.28
	8% de Texilán	2.81	2.05	2.18	3.56	2.85	2.14	43.76	44.22	43.56
8% de Texilán	2.79	1.38	2.33	3.56	2.49	2.85	44.04	45.61	43.14	

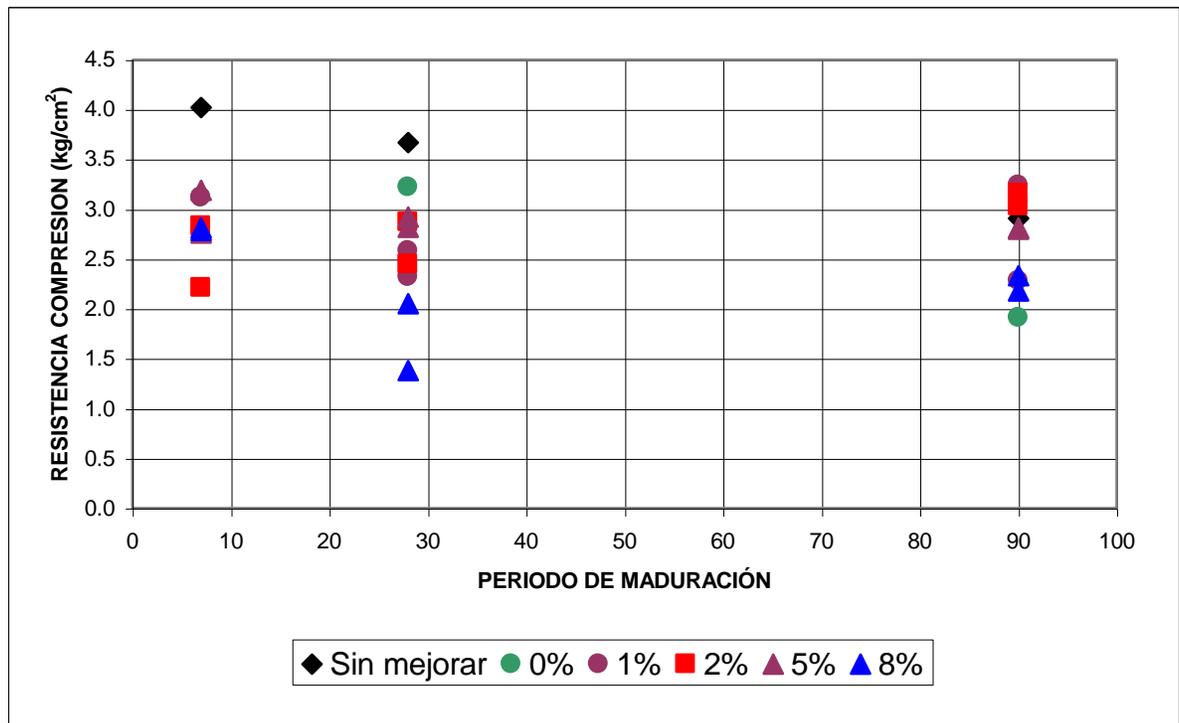
No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de texilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 152 se muestra el efecto del texilán 553 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 152. Efecto del porcentaje de textilán 553 en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 4 con 4% de cal

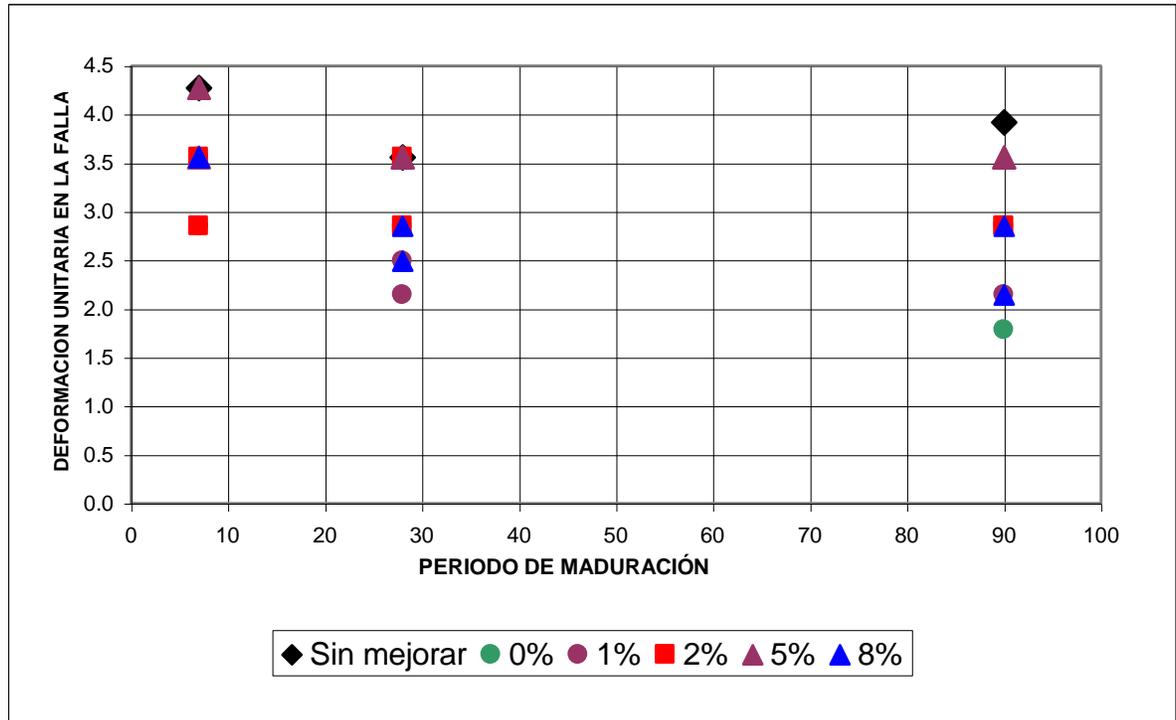


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de textilán produce una disminución inicial en la resistencia del suelo.
 - ✓ No se observan influencia considerable del periodo de maduración en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ No se observan efectos considerables de la cantidad de textilán 553 sobre la resistencia del suelo.
 - ✓ Después de los 90 días las muestras con textilán presentan mayor resistencia que las de suelo-cal debido a que esta última presenta una disminución considerable en su resistencia.
- **Efecto del porcentaje de textilán 553 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 153 se muestra el efecto del textilán 553 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 153. Efecto del porcentaje de texilán 553 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de texilán 553 provoca un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ El periodo de maduración no influye en la deformación unitaria en la falla.

5.5. ANALISIS DEL EFECTO DEL CONSTRUCRIL 1662 EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

5.5.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico-mecánico de los suelos se utilizó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ciento veinte (120) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas del suelo, porcentajes del 2 y 4% de cal y porcentajes de construcril 1662 del 1%, 2%, 5% y 8%.

- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7, 28 y 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada con periodos de maduración de 7, 28 y 90 días, determinando adicionalmente la humedad al momento de la falla y la deformación unitaria en la falla de la briquea.

5.5.2. Resultados

✓ Suelo 2 con 2% de cal

En la tabla 64 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico mecánico del suelo-cal.

Tabla 64. Efecto de la adición de construcril 1662 del suelo 2 con 2% de cal

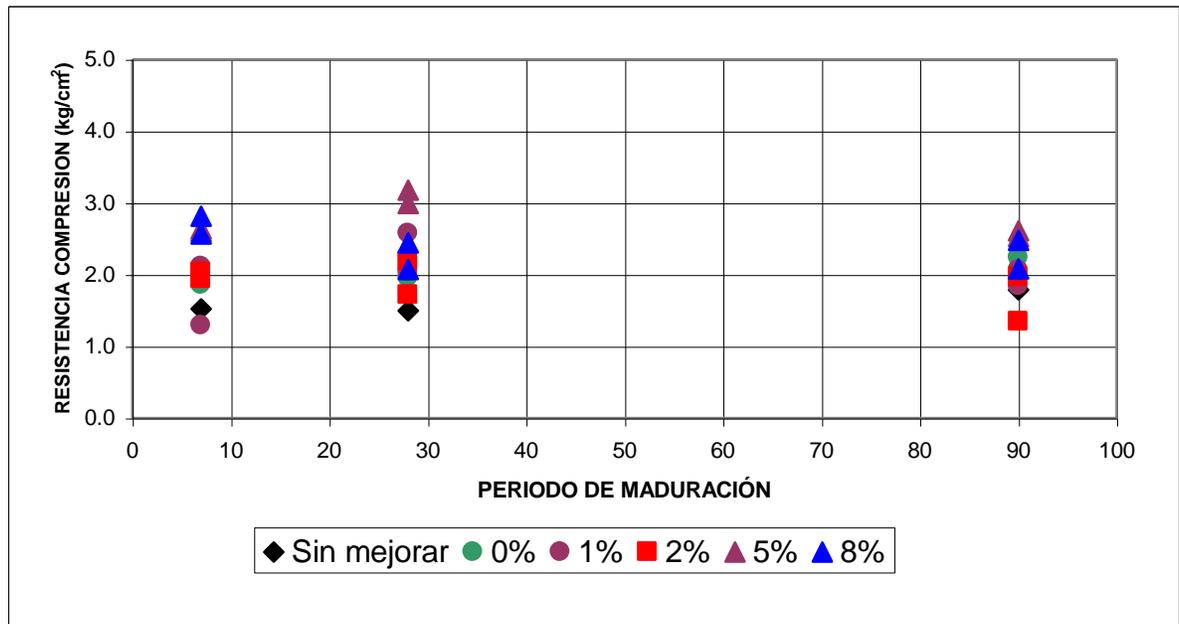
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
2% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
	0% de Construcril	1.86	1.96	2.24	4.99	7.12	5.70	35.67	36.70	34.69
	1% de Construcril	1.29	2.57	1.84	4.99	4.27	3.56	40.75	38.84	35.73
	1% de Construcril	2.12	2.04	2.06	4.27	4.27	3.56	40.06	38.65	36.42
	2% de Construcril	2.04	1.71	1.35	4.99	4.99	4.27	39.35	40.85	40.06
	2% de Construcril	1.94	2.18	1.96	5.70	4.99	4.27	40.43	39.28	40.08
	5% de Construcril	2.63	3.18	2.61	4.99	5.70	3.56	40.18	39.45	39.58
	5% de Construcril	2.61	2.99	2.53	4.27	4.99	4.27	39.86	39.55	39.09
	8% de Construcril	2.81	2.44	2.08	5.70	4.27	4.27	39.92	39.60	40.51
8% de Construcril	2.57	2.07	2.47	4.99	3.56	4.27	40.25	40.27	38.74	

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 154 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 154. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 2 con 2% de cal

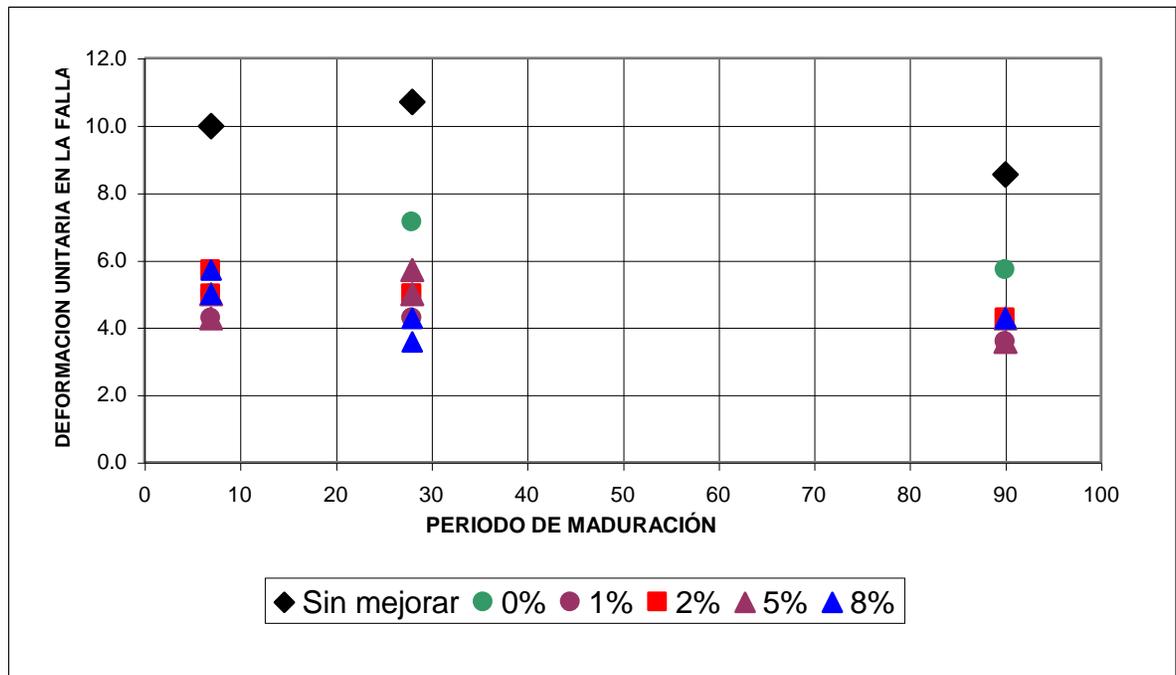


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril no produce efectos significativos en la resistencia del suelo-cal.
- ✓ El periodo de maduración no tiene efectos significativos.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 155 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 155. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril produce una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo.
- ✓ La cantidad de construcril adicionada no tiene efectos significativos sobre la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ En la medida que se incrementa el periodo de maduración se presenta una leve disminución en la deformación unitaria en la falla.

✓ **Suelo 2 con 4% de cal**

En la tabla 65 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril 1662 en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 65. Efecto de la adición del construcril 1662 en el suelo 2 con 4% de cal

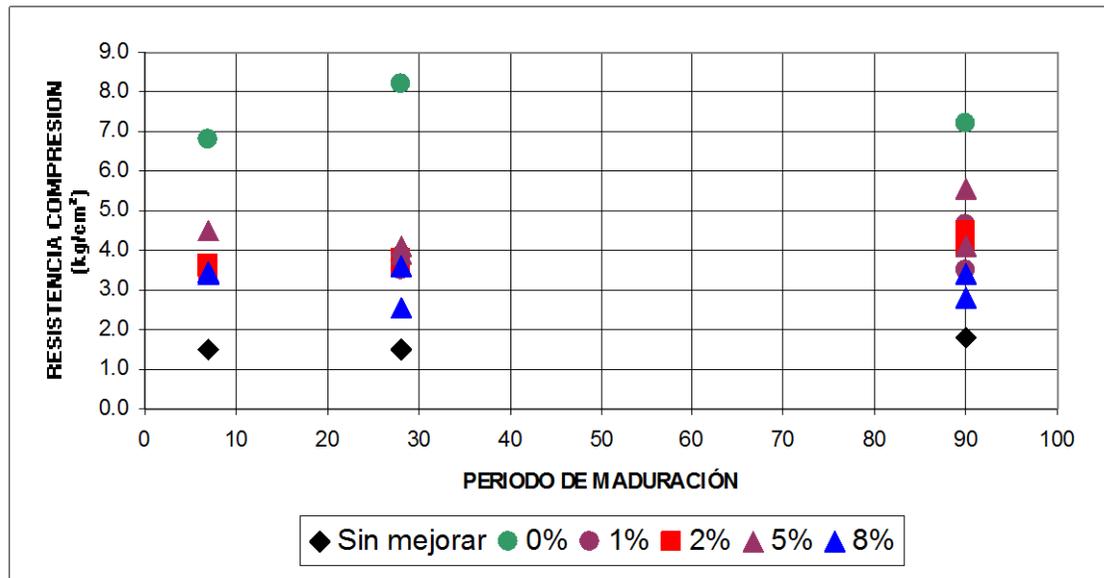
		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
Curado (días)		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Sin mejorar		1.52	1.50	1.79	9.97	10.69	8.55	32.85	33.09	30.30
4% de cal	0% de Construcril	6.82	8.19	7.20	3.21	4.63	2.14	35.19	35.72	35.20
	1% de Construcril	3.34	3.51	4.66	4.27	3.56	3.56	43.89	42.66	41.07
	1% de Construcril	3.59	3.50	3.51	3.74	4.27	3.56	43.58	43.17	42.05
	2% de Construcril	3.64	3.81	4.48	3.92	4.27	3.56	42.83	43.87	41.43
	2% de Construcril	3.55	3.53	4.05	4.63	3.56	3.56	43.02	43.52	41.53
	5% de Construcril	4.51	3.89	5.54	4.27	3.56	4.27	41.84	42.35	38.01
	5% de Construcril	3.40	4.12	4.11	3.56	3.56	2.85	41.60	42.48	41.27
	8% de Construcril	3.45	3.60	2.78	3.56	4.27	3.56	43.02	43.56	43.16
	8% de Construcril	3.40	2.53	3.39	4.27	2.85	2.85	42.94	44.05	42.06

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada**

En la ilustración 156 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 156. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión confinada de suelo 2 con 4% de cal

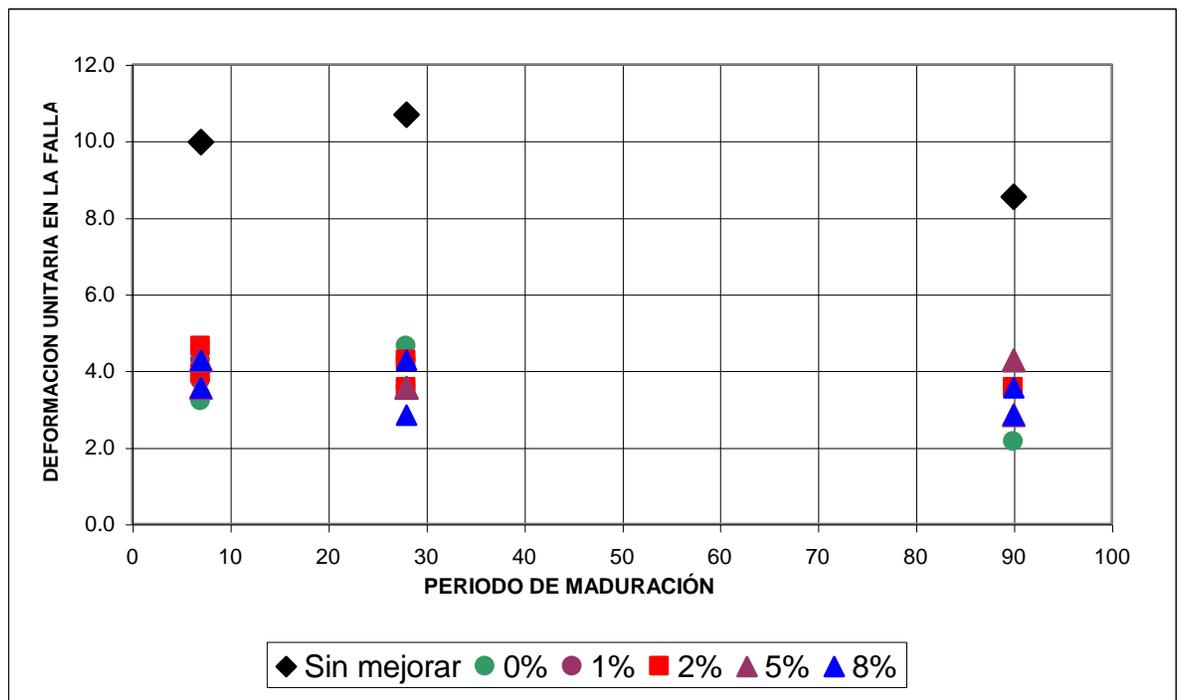


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera disminución en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ La influencia del periodo de maduración en la resistencia del suelo es despreciable.
 - ✓ No se observan efectos significativos de la cantidad de construcril adicionada en la resistencia del suelo.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 157 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 157. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 2 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ No se observan efectos significativos de la adición de construcril sobre la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.

✓ **Suelo 4 con 2% de cal**

En la tabla 66 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril en el comportamiento físico mecánico del suelo.

Tabla 66. Efecto de la adición del construcril 1662 del suelo 4 con 2% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
Curado (días)										
Sin mejorar		4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
2% de cal	0% de Construcril	1.46	1.49	1.34	7.84	8.55	4.99	42.02	ND	41.32
	1% de Construcril	2.74	3.35	3.19	3.56	4.27	5.70	41.74	34.40	40.08
	1% de Construcril	3.26	2.74	3.09	4.27	4.27	2.85	40.52	33.11	39.98
	2% de Construcril	2.45	2.39	2.80	6.41	6.41	7.12	42.27	33.98	41.90
	2% de Construcril	2.58	2.36	2.84	7.12	5.70	5.70	42.86	30.60	41.77
	5% de Construcril	2.71	2.38	4.33	3.56	3.56	3.56	40.24	33.05	40.88
	5% de Construcril	2.59	2.49	2.76	4.99	3.56	2.85	39.55	30.92	41.20
	8% de Construcril	1.99	2.67	2.51	8.55	7.84	7.12	43.40	34.36	43.16
	8% de Construcril	2.13	2.54	2.12	9.08	4.99	5.70	43.30	31.06	42.95

ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

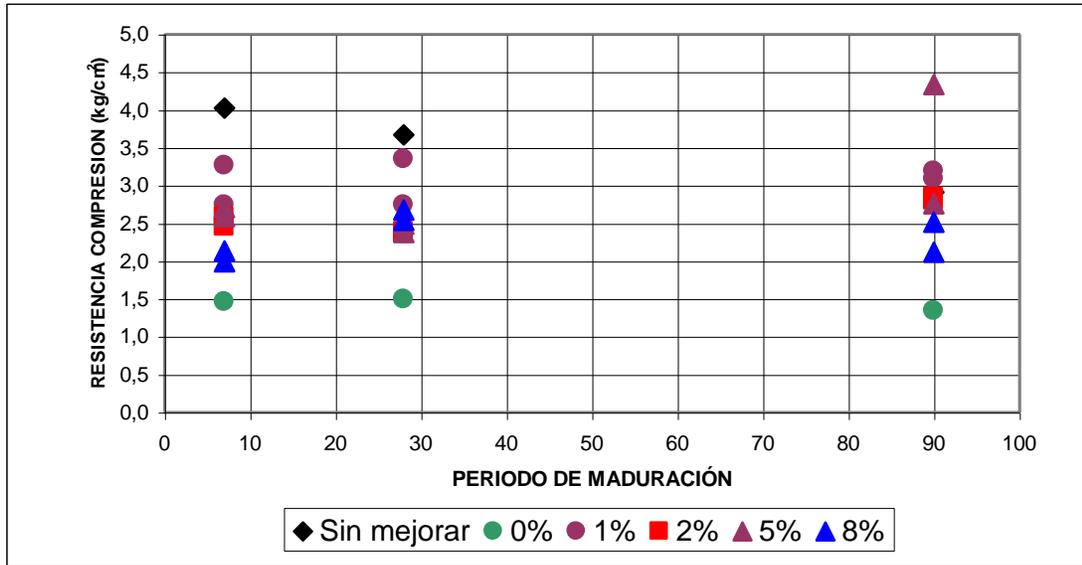
➤ **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada**

En la ilustración 158 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Del análisis de los resultados presentados en la ilustración 158 se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril produce un incremento en la resistencia del suelo-cal.
- ✓ La cantidad de construcril adicionada no tiene influencia significativa sobre el incremento de la resistencia.
- ✓ El periodo de maduración no tiene influencia significativa sobre la resistencia del suelo.

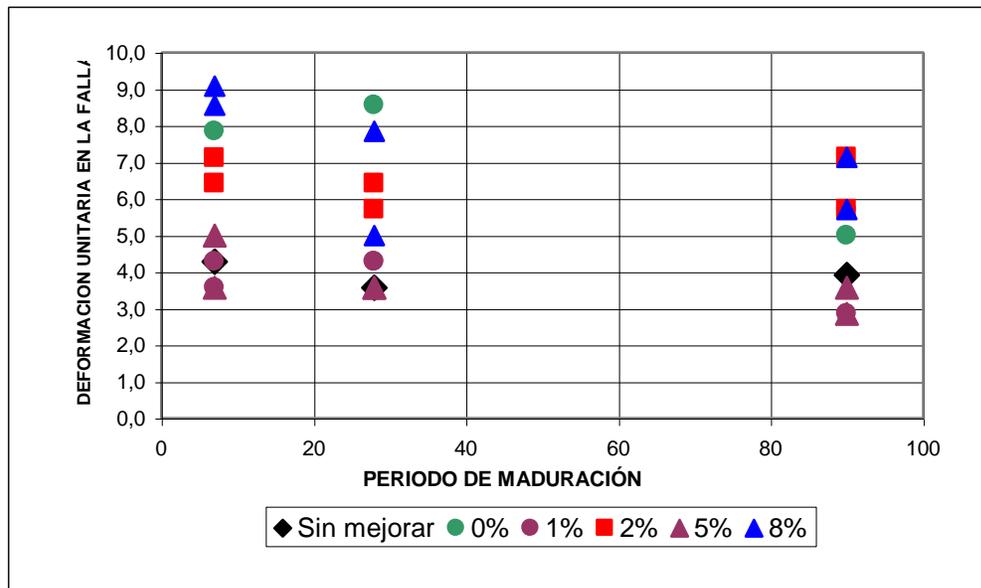
Ilustración 158. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 4 con 2% de cal



➤ **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 159 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 159. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 2% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril produce una disminución inicial de la deformación unitaria en la falla.
- ✓ La deformación unitaria en la falla disminuye en la medida que se incrementa el periodo de maduración.

✓ **Suelo 4 con 4% de cal**

En la tabla 67 se presentan los resultados del análisis del efecto del construcril en el comportamiento físico-mecánico del suelo.

Tabla 67. Efecto de la adición del construcril 1662 del suelo 4 con 4% de cal

		Resistencia (Kg/cm ²)			Deformación unitaria en la falla			Humedad (%)		
		7	28	90	7	28	90	7	28	90
4% de cal	Curado (días)									
	Sin mejorar	4.02	3.67	2.91	4.27	3.56	3.92	38.39	48.80	49.69
	0% de Construcril	3.12	3.22	1.91	3.56	2.85	1.78	41.74	ND	40.48
	1% de Construcril	1.47	2.05	2.02	4.27	4.99	3.56	46.08	31.72	45.28
	1% de Construcril	1.82	1.00	2.57	4.27	2.14	5.70	44.18	37.07	45.10
	2% de Construcril	2.34	1.68	2.45	7.84	7.84	7.84	46.15	44.94	45.13
	2% de Construcril	2.21	1.67	1.76	7.12	7.12	5.70	46.23	45.79	45.73
	5% de Construcril	1.64	1.25	2.40	7.12	5.70	7.84	46.74	46.58	45.25
	5% de Construcril	1.71	1.79	1.66	7.12	7.66	7.84	46.79	45.47	46.07
	8% de Construcril	1.64	1.57	2.23	7.12	8.55	7.84	46.87	45.57	45.56
8% de Construcril	1.85	1.61	2.55	9.26	9.26	8.55	47.24	45.78	45.39	

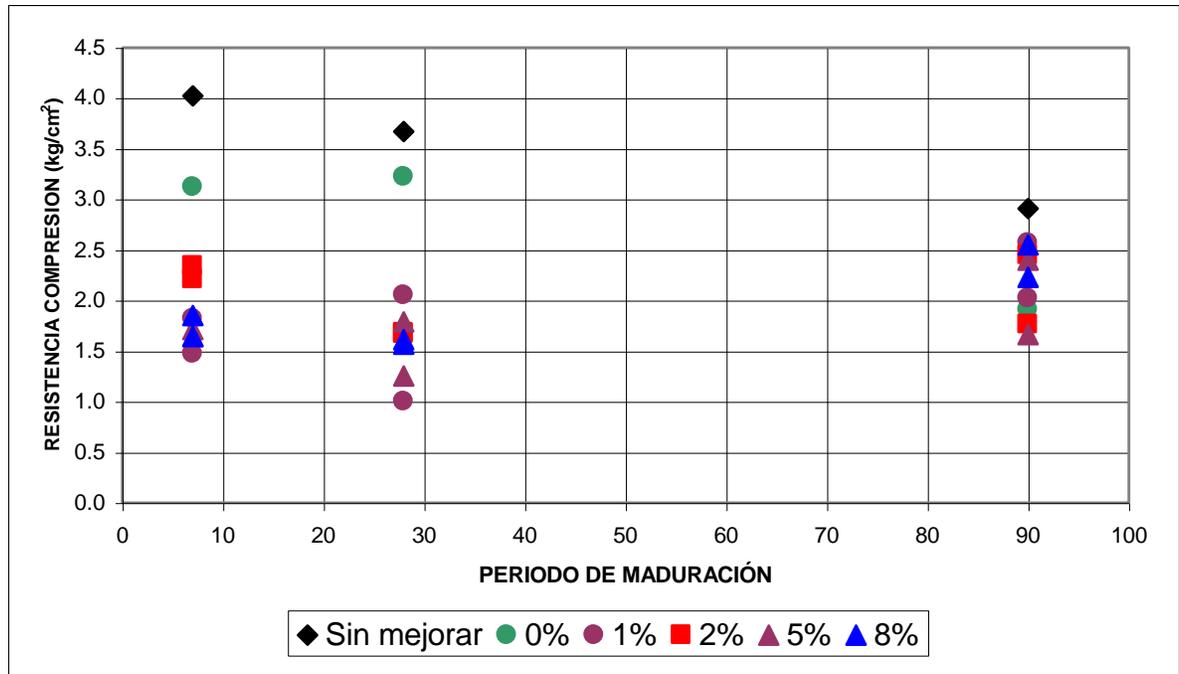
ND: No determinada

De los anteriores resultados se pueden hacer los siguientes análisis:

- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada.**

En la ilustración 160 se muestra el efecto del construcril 1662 en la resistencia del suelo para diferentes periodos de curado.

Ilustración 160. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la resistencia a la compresión inconfiada de suelo 4 con 4% de cal

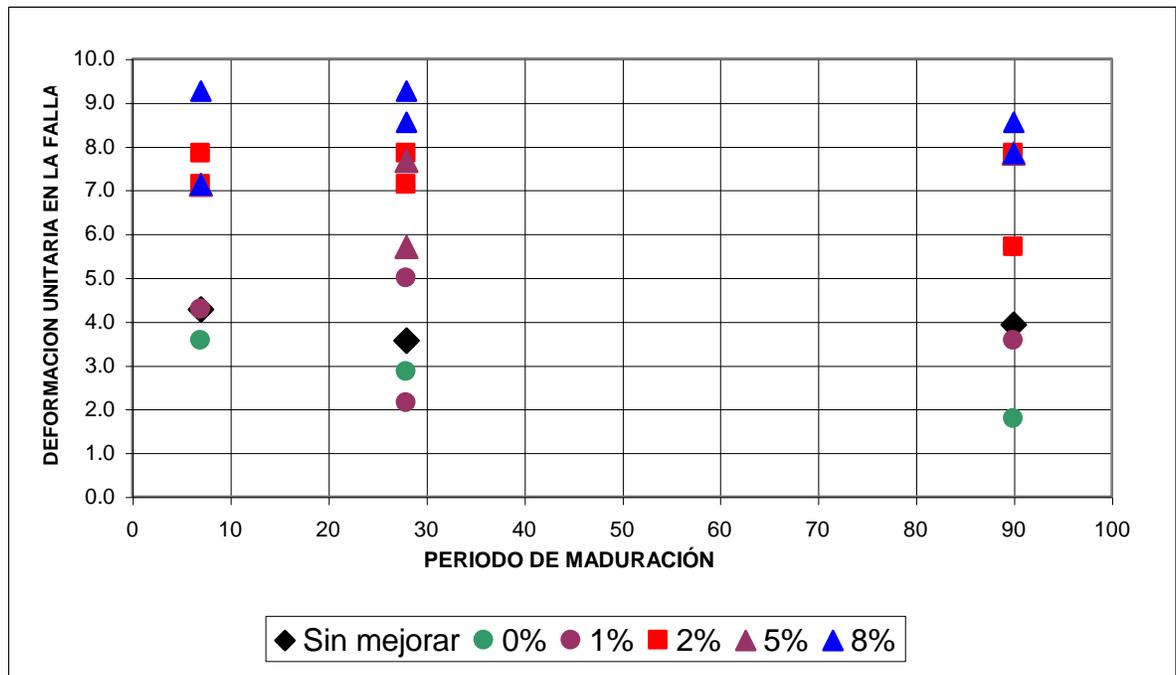


Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera una disminución inicial en la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ La resistencia del suelo se incrementa en la medida que aumenta el periodo de maduración.
 - ✓ La cantidad de construcril no tiene influencia significativa sobre la resistencia del suelo-cal.
 - ✓ Para un periodo de maduración de 90 días no hay beneficios apreciable por la adición de construcril.
- **Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla**

En la ilustración 161 se muestra el efecto del construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla para diferentes periodos de curado.

Ilustración 161. Efecto del porcentaje de construcril 1662 en la deformación unitaria en la falla del suelo 4 con 4% de cal



Del análisis de los resultados presentados en la anterior ilustración se pueden inferir los siguientes comportamientos:

- ✓ La adición de construcril genera un incremento en la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ Para cantidades de construcril del 2% o menores la deformación unitaria en la falla aumenta en la medida que aumenta el contenido de construcril.
- ✓ Para cantidades de construcril superiores al 2% no se observan efectos significativos del aumento del construcril sobre la deformación unitaria en la falla del suelo-cal.
- ✓ Se observa una leve disminución de la deformación unitaria en la falla en la medida que se incrementa el periodo de maduración.

6. VERIFICACION DE RESULTADOS

6.1. INTRODUCCION

En los capítulos anteriores se ha podido observar que la adición de diferentes productos a los suelo producen efectos ya sea positivo o negativo sobre una o varias de las propiedades estudiadas.

Teniendo en cuenta los resultados que se han obtenidos durante el desarrollo del presente estudio es necesario realizar una serie de pruebas adicionales que permitan verificar el efecto que presentan los diferentes productos adicionados al suelo sobre sus características.

En este capítulo se presentan los resultados de pruebas adicionales que permitan verificar los resultados hasta ahora obtenidos.

6.2. ANALISIS DE LA RESISTENCIA A LA ACCION DEL AGUA

6.2.1. Generalidades

Con el fin de estudiar el efecto del agua sobre las muestras estabilizadas se empleó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de doscientas veinticuatro (224) briquetas con el procedimiento del harvard miniatura con mezclas de los suelos 2 o 4 con los estabilizantes que mejores resultados presentaron en los capítulos anteriores.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 7 y 28 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia **sin inmersión**, las cuales consisten en medir la resistencia a la compresión inconfiada de las muestras una vez cumplieron periodos de maduración de 7 y 28 días.
- ✓ Otras briquetas una vez cumplen periodos de curado de 7 y 28 días fueron sometidas a pruebas de resistencia **con inmersión**, las cuales consisten en colocar las muestras en agua durante 15 minutos, permitir el drenaje durante 5 minutos al aire y se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión inconfiada.

6.2.2. Resultados

✓ Suelo 2

En la tabla 68 se presentan los resultados del análisis de la resistencia al agua que presentan el suelo 2 una vez a sido sometido a diversos procesos de estabilización.

Tabla 68. Resistencia a la acción del agua del suelo 2

Estabilización	Sin Inmersión				Con inmersión			
	7	7	28	28	7	7	28	28
Suelo natural	1.68	MNE	1.96	MNE	MDI	MNE	0.56	MNE
4% Cal	6.05	6.28	5.72	6.44	2.67	3.72	4.36	2.77
6% Cal	14.49	12.35	11.83	11.40	10.59	11.56	11.87	11.43
3% Cal + 1% Silicato	4.81	5.09	MNE	MNE	2.16	2.59	MNE	MNE
3% Cal + 2% Silicato	3.51	2.85	MNE	MNE	MDI	MDI	MNE	MNE
3% Cal + 5% Silicato	3.70	3.22	MNE	MNE	MDI	MDI	MNE	MNE
3% Cal + 8% Silicato	2.74	3.05	MNE	MNE	MDI	MDI	MNE	MNE
4% Cal + 1% Silicato	5.72	6.78	6.96	6.43	3.41	3.48	3.60	3.15
4% Cal + 2% Silicato	5.21	4.58	5.17	5.95	2.40	2.59	2.98	2.91
4% Cemento	4.79	4.84	4.28	5.25	0.29	0.60	0.29	0.96
3% Cem +1% Silicato	2.76	2.26	MNE	MNE	2.70	MDI	MNE	MNE
4% Cem +1% Silicato	3.90	3.06	3.47	3.83	MDI	MDI	MDI	MDI
4% Cem +2% Silicato	3.23	3.29	3.45	2.61	MDI	MDI	MDI	MDI
4% Cem + 1%Texilán	4.27	4.21	3.49	4.03	0.20	MDI	1.28	1.50
4% Cem + 2% Texilán	4.10	5.05	4.38	3.88	1.78	1.60	1.82	1.57
4% Cal + 4% Cemento	17.72	13.50	MNE	MNE	10.77	11.18	MNE	MNE

MNE: Muestras no elaboradas

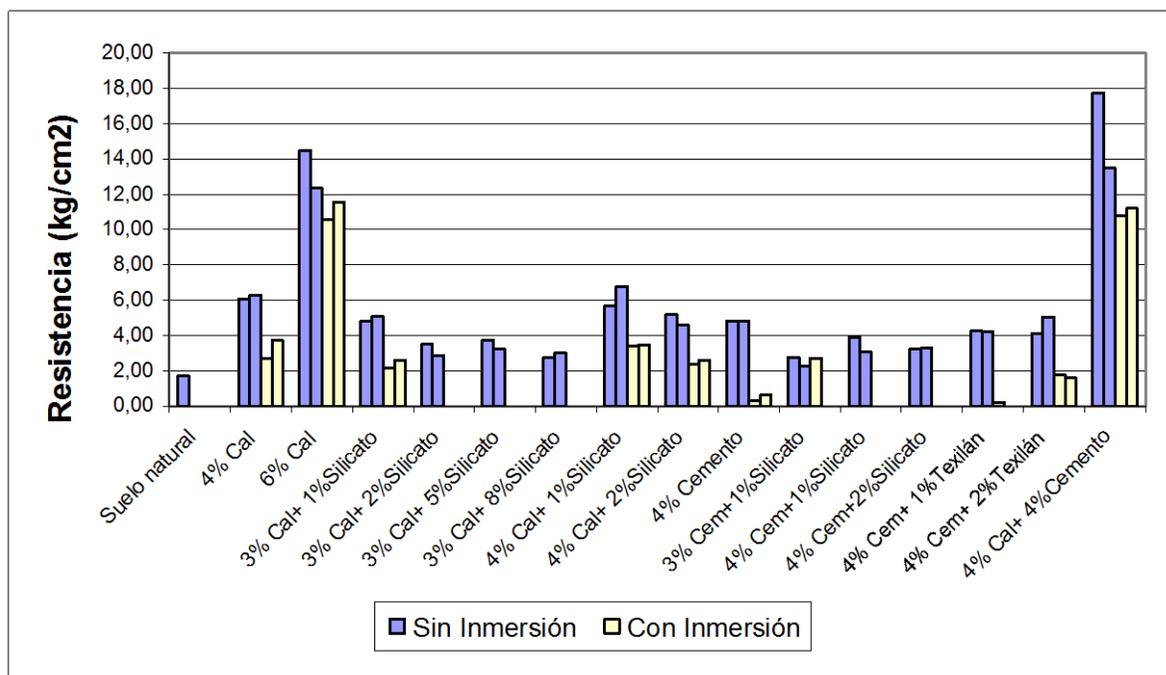
MDI: Muestra destruida por la Inmersión

Con el fin de facilitar su análisis los resultados para un periodo de 7 días de curado se presentan en la ilustración 162 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

- ✓ Todas las combinaciones de estabilizantes adicionadas al suelo contribuyen a un incremento en la resistencia del suelo natural que varia entre un 100 y un 1000%, cuando estas son sometidas a la prueba de resistencia sin inmersión.
- ✓ Los mejores resultados de resistencia sin inmersión se obtienen cuando se adiciona un 4% de cal más un 4% de cemento, pero también se obtienen buenos resultados si se adiciona un 6 % de cal únicamente.

- ✓ Aquellas muestras que presentan un contenido de cal superior al 4% presentan disminución de la resistencia, después de ser sometidas al proceso de inmersión, que varían entre el 5 y el 60% conservando siempre una resistencia superior a la del suelo en estado natural.
- ✓ Las menores pérdidas de resistencia se presentan cuando el suelo se estabilizó con un contenido de cal del 6%.
- ✓ Las muestras que no contienen cal o que su porcentaje es menor del 4% se deshicieron al ser sometidas a la acción del agua.
- ✓ Las muestras que contienen silicato sufren una pérdida fuerte de resistencia después de la inmersión.
- ✓ Las muestras que contienen cemento tienden a deshacerse más rápido con la acción del agua

Ilustración 162. Resistencia a la acción del agua a los 7 días de curado. Suelo 2

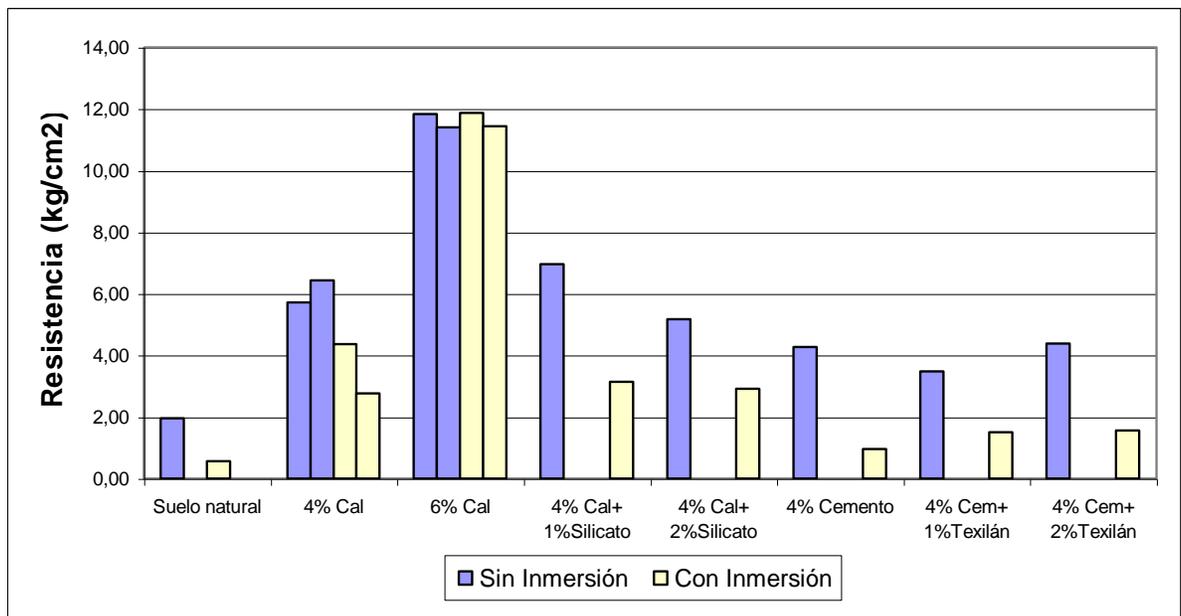


En la ilustración 163 se presentan los resultados de obtenidos en esta prueba para un periodo de maduración de 28 días, y en ella se puede observar:

- ✓ Todas las combinaciones de estabilizantes adicionadas al suelo contribuyen a un incremento en la resistencia que varía entre un 100 y un 600%.

- ✓ Los mejores resultados de resistencia se obtienen cuando se adiciona un 6% de cal.
- ✓ Las muestra que contienen cal siguen siendo las que mejor se comportan ante la acción del agua.
- ✓ Las muestra estabilizada con un 6% de cal no presentan perdidas en la resistencia ante la acción del agua.
- ✓ Las muestra que no contienen cal se deshicieron al ser sometidas a la acción del agua.

Ilustración 163. Resistencia a la acción del agua a los 28 días de curado. Suelo 2



✓ **Suelo 4**

En la tabla 69 se presentan los resultados del análisis de la resistencia al agua que presenta el suelo 4 una vez a sido sometido a diversos procesos de estabilización.

Tabla 69. Resistencia a la acción del agua del suelo 4

Estabilización	Sin Inmersión				Con inmersión			
	7	7	28	28	7	7	28	28
Suelo Natural	2.93	MNE	2.96	MNE	0.29	MNE	0.25	MNE
2% Cal	2.55	2.45	2.34	2.96	0.31	0.67	0.91	0.75
2% Cal+ 1%Construcril	2.03	2.49	2.05	2.53	0.90	1.10	0.63	0.76
2% Cal+ 1%Silicato	2.51	2.15	2.54	3.01	0.62	0.67	0.77	0.89
3% Cal	2.41	2.97	2.55	5.29	1.59	1.15	1.19	0.86
3% Cal+ 1%Silicato	3.08	2.64	2.71	2.61	0.67	0.99	0.86	0.93
4% Cal	2.34	2.01	2.80	3.10	0.84	0.87	1.08	1.19
4% Cal+ 1%Silicato	2.05	1.18	2.44	1.83	0.86	0.92	1.01	1.13
4% Cal+ 2%Silicato	2.71	1.34	2.88	3.31	1.09	0.61	0.99	0.94
4% Cemento	3.01	2.76	2.83	2.98	0.77	0.97	0.96	0.84
4% Cem+1%Silicato	2.56	3.10	2.71	3.33	0.74	0.56	0.96	0.77
4% Cem+2%Silicato	2.80	2.92	2.94	2.90	0.84	1.02	0.89	0.96
4% Cem+1%Texilán	3.16	2.91	4.45	3.71	1.24	1.09	0.68	0.89
4% Cem+2%Silic+4%Diclo	2.32	2.53	3.14	2.97	1.08	1.04	1.09	0.85
1%Silicato	3.39	3.29	3.45	3.42	0.67	0.50	0.96	0.77
2%Silicato+5% Dicloruro	2.93	3.35	4.02	2.91	0.92	0.89	0.74	0.67

MNE: Muestras no elaboradas

Con el fin de facilitar su análisis los resultados para un periodo de 7 días de curado se presentan en la ilustración 164 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

- ✓ No se observan incrementos considerables en la resistencia debidas a la adición de los estabilizantes.
- ✓ Todas las muestras presentan una perdida de resistencia entre el 20 y el 90% debido a la acción del agua.
- ✓ Ninguna muestra se destruyó o deshizo debido a la acción del agua.

En la ilustración 165 se presentan los resultados de obtenidos en esta prueba para un periodo de maduración de 28 días, y en ella se puede observar:

- ✓ No se observan incrementos considerables en la resistencia debidas a la adición de los estabilizantes.
- ✓ Todas las muestras presentan una perdida de resistencia entre el 40 y el 80% debido a la acción del agua.
- ✓ Ninguna muestra se destruyó o deshizo debido a la acción del agua.
- ✓ No se observan beneficios considerables de la maduración de las muestras.

Ilustración 164. Resistencia a la acción del agua a los 7 días de curado. Suelo 4

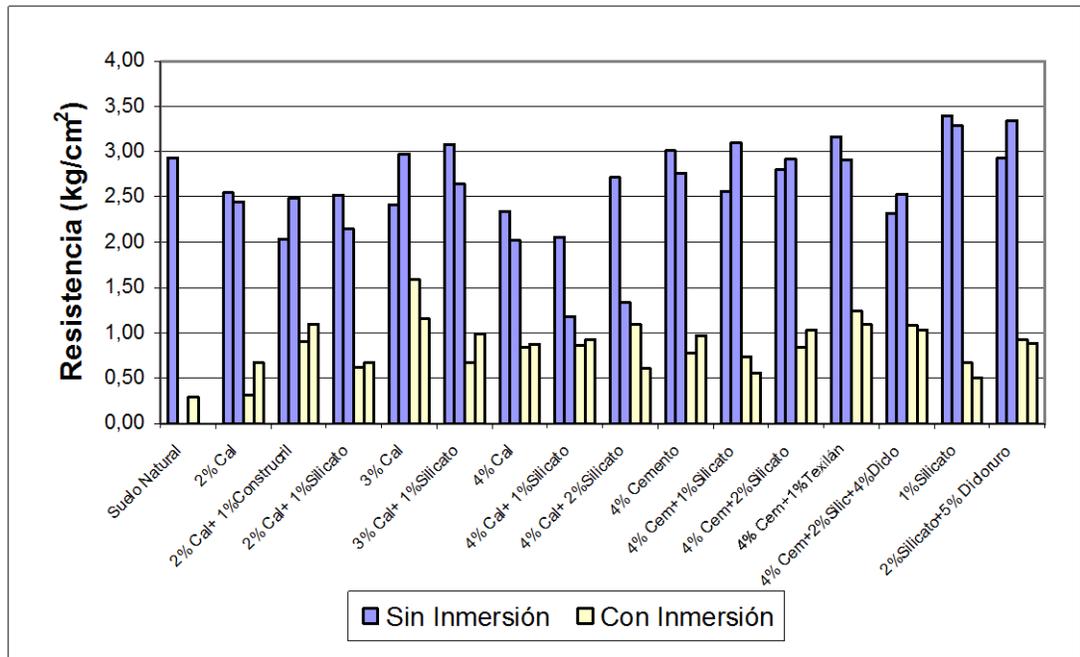
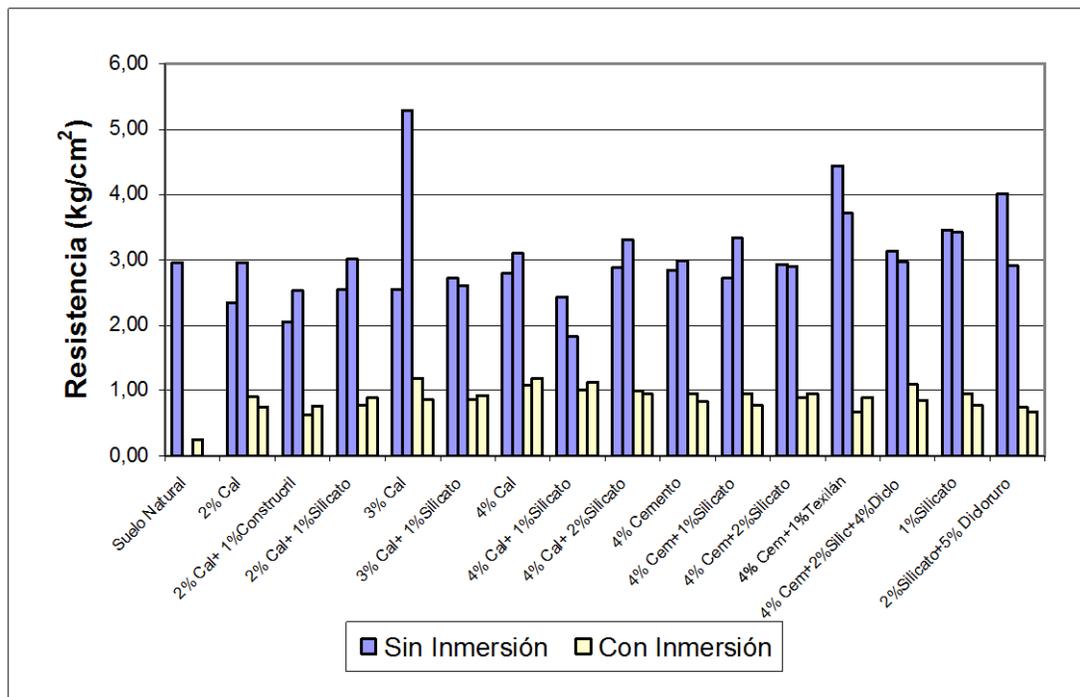


Ilustración 165. Resistencia a la acción del agua a los 28 días de curado. Suelo 4



6.3. ANALISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA EN BRIQUETAS GRANDES

6.3.1. Generalidades

Con el fin de verificar los resultados de resistencia obtenidos se empleó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de cuarenta y ocho (48) briquetas de 8 cm de diámetro y altura 16 cm con mezclas de los suelos 2 y 4 con diferentes procedimientos de estabilización que mejores resultados habían presentado, compactadas con el martillo del proctor estándar.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 90 días.
- ✓ Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión inconfiada.

6.3.2. Resultados

✓ Suelo 2

En la tabla 70 se presentan los resultados de la verificación de los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2.

Tabla 70. Verificación de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2

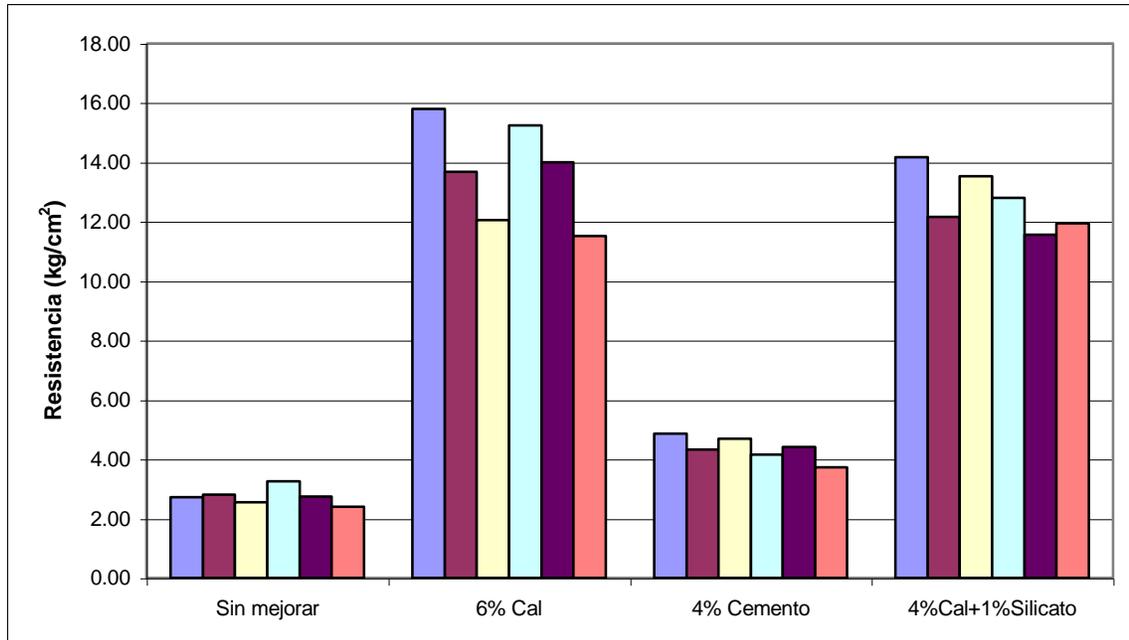
Muestra	A	B	C	D	E	F
Sin mejorar	2.72	2.81	2.55	3.26	2.75	2.40
6% Cal	15.79	13.68	12.05	15.24	14.00	11.52
4% Cemento	4.85	4.33	4.69	4.15	4.41	3.73
4%Cal+1%Silicato	14.16	12.15	13.52	12.79	11.56	11.95

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 166 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan incrementos en la resistencia del suelo.
- ✓ Se obtienen incrementos del 120 al 600%.
- ✓ Los mejores resultados se obtienen cuando se le adiciona un 6% de cal.

- ✓ La adición de un 4% de cal + el 1% de silicato permite obtener resultados similares al los que se obtiene con un 6% de cal.

Ilustración 166. Verificación de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 2



✓ **Suelo 4**

En la tabla 71 se presentan los resultados de la verificación de la resistencia a la compresión inconfiada en el suelo 4.

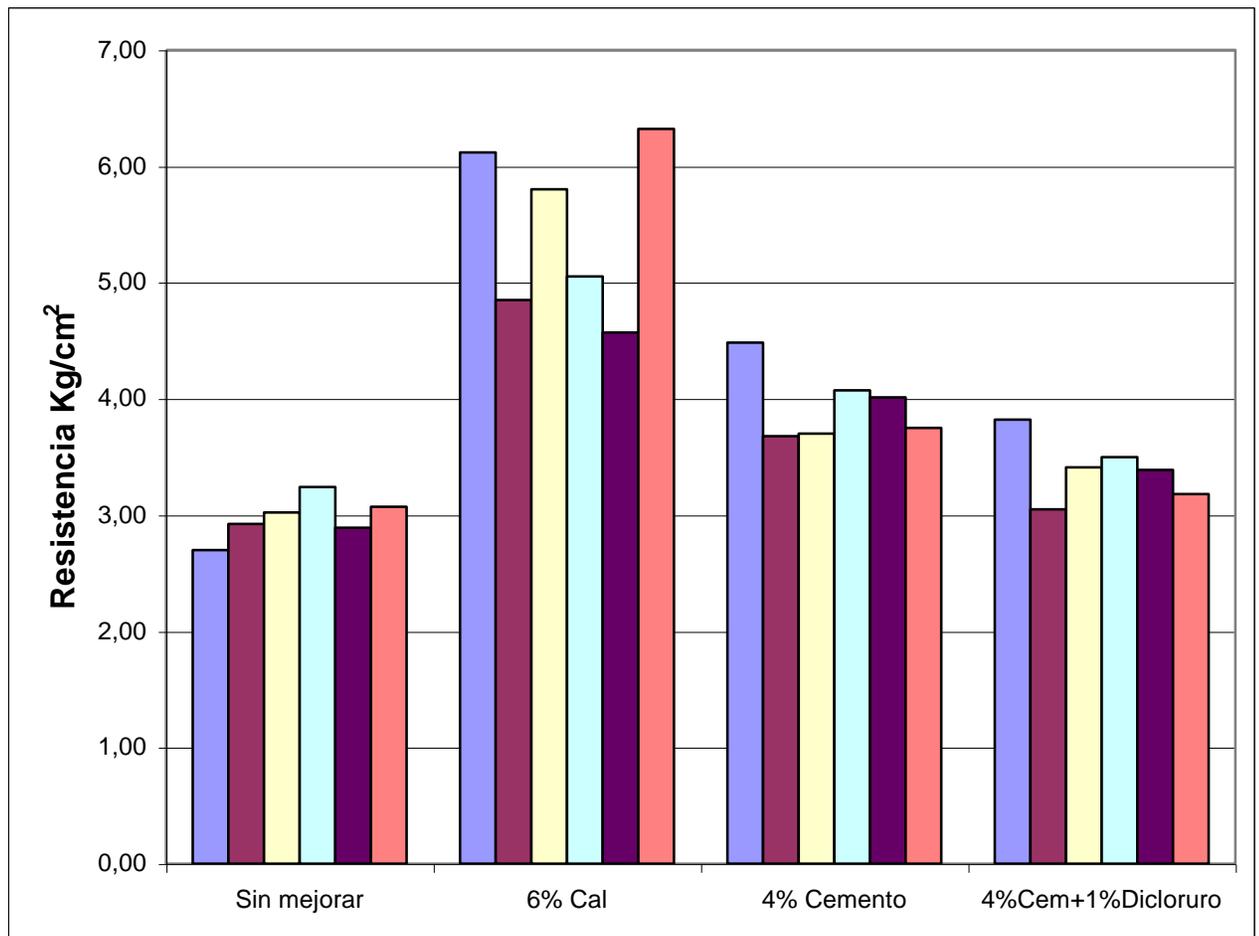
Tabla 71. Verificación de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4

Muestra	A	B	C	D	E	F
Sin mejorar	2.70	2.92	3.02	3.24	2.89	3.07
6% Cal	6.12	4.85	5.80	5.05	4.57	6.32
4% Cemento	4.48	3.68	3.70	4.07	4.01	3.75
4% Cem+1% Dicloruro	3.82	3.05	3.41	3.50	3.39	3.18

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 167 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan incrementos en la resistencia del suelo.
- ✓ Se obtienen incrementos del 10 al 230%.
- ✓ Los mejores resultados se obtienen cuando se le adiciona un 6% de cal.
- ✓ Los resultados de los incrementos de la resistencia del suelo 4 son mucho menores que los obtenidos para el suelo 2.

Ilustración 167. Verificación de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo 4



6.4. ANALISIS DE LA VARIACION DEL pH

6.4.1. Generalidades

Con el fin de analizar la variación del pH en los suelo se empleó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de ocho (8) briquetas de 8 cm de diámetro y altura 16 cm con mezclas de los suelos 2 y 4 con diferentes procedimientos de estabilización que mejores resultados habían presentado.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 90 días.
- ✓ Se realizó la medición del pH a una muestra tomada de las briquetas.

6.4.2. Resultados

✓ Suelo 2

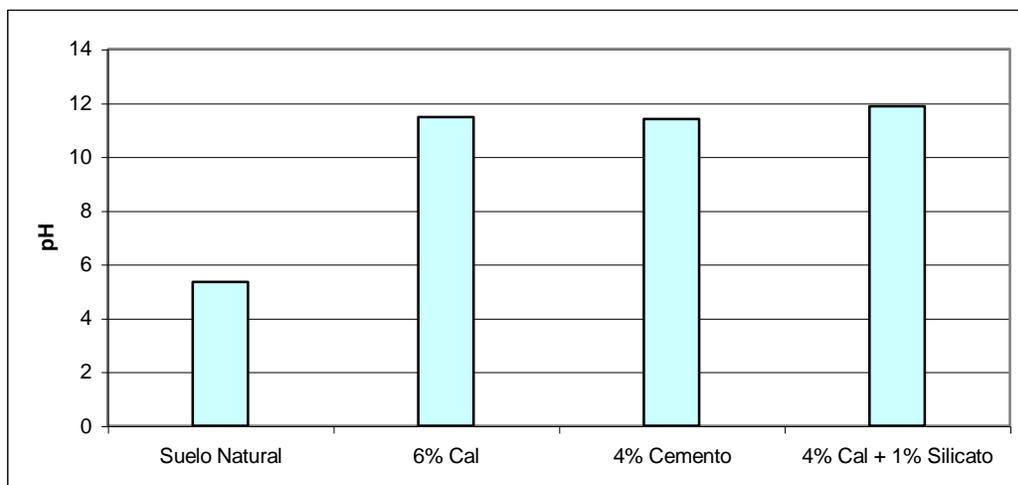
En la tabla 72 se presentan los resultados de la verificación de los resultados de resistencia en el suelo 2.

Tabla 72. Variación del pH del suelo 2

Muestra	pH
Suelo Natural	5.35
6% Cal	11.46
4% Cemento	11.41
4% Cal + 1% Silicato	11.87

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 168 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

Ilustración 168. Variación del pH del suelo 2



- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan incrementos en pH.
- ✓ El pH del suelo estabilizado en todos los casos esta alrededor de 11.5.
- ✓ El pH no es un indicador de la efectividad de un producto para mejorar un suelo.

✓ **Suelo 4**

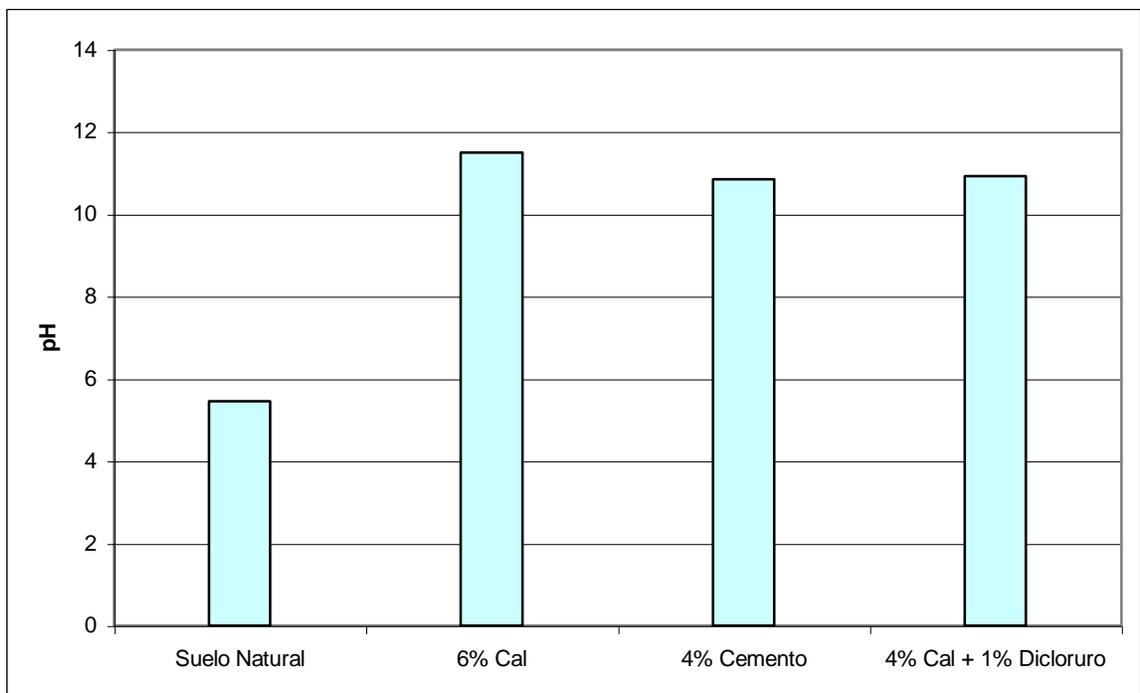
En la tabla 73 se presentan los resultados de la verificación de los resultados de resistencia en el suelo 4.

Tabla 73. Variación del pH del suelo 4

Muestra	pH
Suelo Natural	5.46
6% Cal	11.49
4% Cemento	10.85
4% Cal + 1% Dicloruro	10.93

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 169 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

Ilustración 169. Variación del pH del suelo 4



- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan incrementos en pH.
- ✓ El pH del suelo estabilizado en todos los casos esta alrededor de 11
- ✓ El pH no es un indicador de la efectividad de un producto para mejorar un suelo.

6.5. ANALISIS DE LA VARIACION DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA

6.5.1. Generalidades

Con el fin de analizar la variación de los límites de consistencia se empleó el siguiente plan de trabajo:

- ✓ Elaboración de veinticuatro (24) briquetas de 8 cm de diámetro y altura 16 cm con mezclas de los suelos 2 y 4 con diferentes procedimientos de estabilización que mejores resultados habían presentado.
- ✓ Se envolvió cada una de las briquetas con papel aluminio y se cubrió con parafina con el fin de garantizar que durante el curado no pierdan humedad.
- ✓ Se colocaron la muestras en un lugar fresco para que maduraran durante 90 días.
- ✓ Se realizó la medición de los límites de consistencia a una muestra tomada de las briquetas.

6.5.2. Resultados

✓ Suelo 2

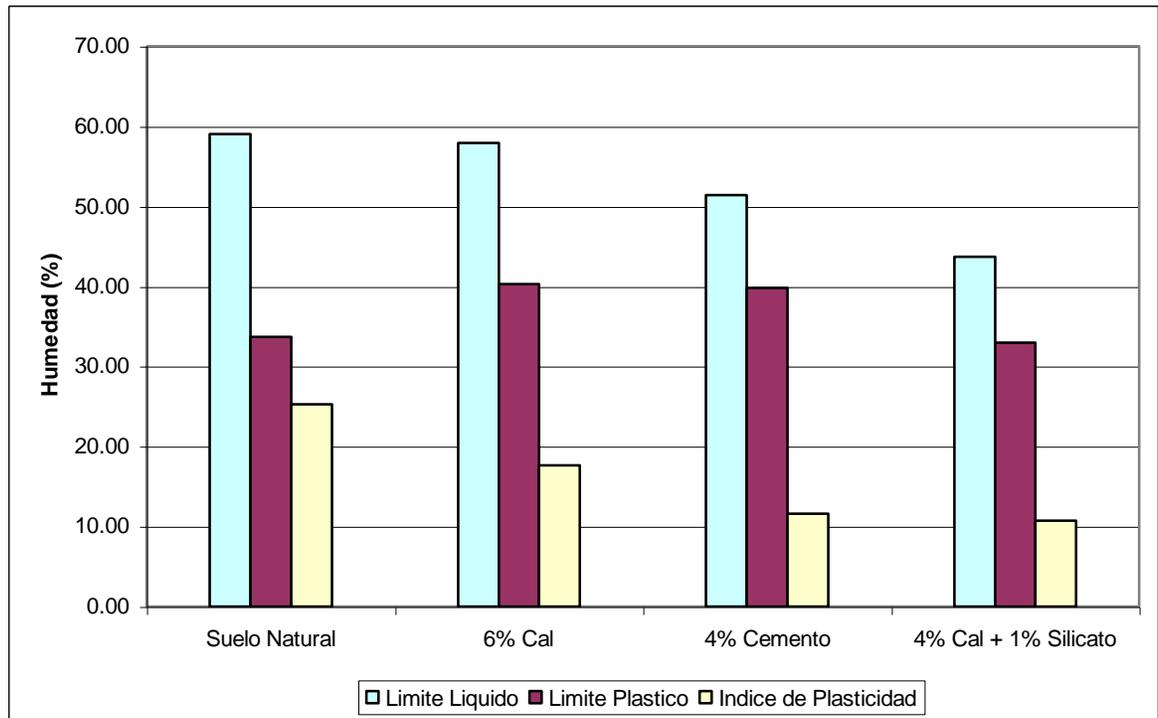
En la tabla 74 se presentan los resultados de la verificación de los resultados de resistencia en el suelo 2.

Tabla 74. Variación de los límites de consistencia del suelo 2

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Suelo Natural	59.00	33.70	25.30
6% Cal	57.90	40.30	17.60
4% Cemento	51.40	39.80	11.60
4% Cal + 1% Silicato	43.70	33.00	10.70

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 170 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

Ilustración 170. Variación de los límites de consistencia del suelo 2



- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan variación en los límites de consistencia, como era de esperarse.
- ✓ En todos los casos de estabilización hay una disminución del límite líquido.
- ✓ En todos los casos se presentó un incremento en el límite plástico o permaneció constante.
- ✓ El Índice de Plasticidad se reduce en todos los casos.
- ✓ La estabilización con un 6% de cal es la que menos variaciones produce en el suelo.
- ✓ Las mayores variaciones se producen con la adición de un 4% de cal más un 1% de silicato en donde el límite líquido se reduce en un 26% pasando de 59 a 43.70%, el límite plástico permanece constante y el índice de plasticidad se reduce en un 57% pasando de 25.30 a 10.70%.

✓ **Suelo 4**

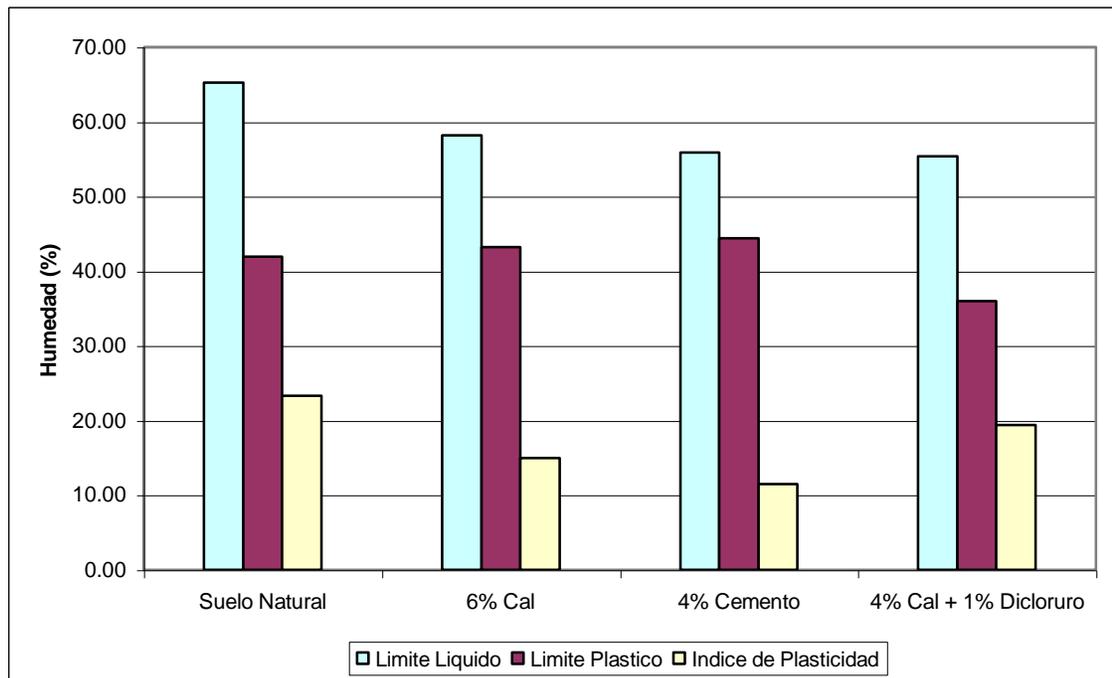
En la tabla 75 se presentan los resultados de la verificación de los resultados de resistencia en el suelo 4.

Tabla 75. Variación de los límites de consistencia del suelo 4

Muestra	LL	LP	IP
Suelo Natural	65.20	41.90	23.30
6% Cal	58.20	43.20	15.00
4% Cemento	55.90	44.40	11.50
4% Cal + 1% Dicloruro	55.40	36.00	19.40

Con el fin de facilitar su análisis los resultados estos se presentan en la ilustración 171 de una manera gráfica, en ellos se pueden observar los siguientes aspectos:

Ilustración 171. Variación de los límites de consistencia del suelo 4



- ✓ Todos los casos de estabilización analizados presentan variación en los límites de consistencia.
- ✓ En todos los casos de estabilización se presentó una disminución del Límite Líquido.
- ✓ El Índice de Plasticidad se reduce en todos los casos.
- ✓ La estabilización con un 4% de cal más un 1% de dicloruro de sodio es la que menos variaciones produce en el suelo.
- ✓ Las mayores variaciones se producen con la adición de un 4% de cemento en donde el límite líquido se reducen un 14% pasando de 65.20 a 55.9%, el límite plástico se incrementa en un 6% pasando de 41.90 a 44.40% y el índice de plasticidad se reduce en un 50% pasando de 23.30 a 11.50%.

7. CONCLUSIONES

1. Los suelos empleados poseen una humedad natural superior al límite plástico e inferior al límite líquido lo que indica que presentan un comportamiento plástico en el cual se deforman ante la acción de las cargas y no se recuperan una vez éstas desaparecen siendo una condición poco deseable para su uso ingenieril.
2. Los suelo 1 y 4 corresponden a limos de alta plasticidad, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos, los cuales presentan un índice de plasticidad superiores al 12% lo que indica, según la bibliografía consultada que debe emplearse cal antes de cualquier proceso de estabilización para disminuir los altos índices de plasticidad.
3. Los suelos 2 y 3 corresponden a limos de baja plasticidad, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos, los cuales presentan índices de plasticidad menores al 12%, lo que indica que podrían ser estabilizados mediante la adición de algún estabilizante como el cemento de una manera directa.
4. La resistencia a la compresión inconfiada de probetas harvard miniatura compactadas con la energía del proctor modificado de los suelos con su humedad natural varía entre 1 y 4 kg/cm² dependiendo del tipo de suelo y de su contenido de humedad lo que indica que la resistencia de los suelos es aceptable.
5. Los suelos analizados presentan en su estado natural pHs menores de 7, lo que indica que el agua que contienen los suelos es ácida donde se forman zonas cargadas positivamente debido a la absorción de iones de hidrógeno en los bordes expuestos de las láminas octaédricas; lo anterior hace que los suelos sean susceptibles de ser estabilizados químicamente mediante la adición de productos como la cal o el cemento.
6. La capacidad de intercambio catiónico que presentan los suelo varía entre 11 y 26meq/100 gr. lo que indica que se trata de suelos de origen mineral, siendo estos los que en la practica son factibles a ser estabilizados con el fin de mejorar su comportamiento ingenieril, ya que tienen una alta capacidad de intercambio cationico y poco contenido de materia orgánica.
7. El empleo de la prueba del grumo y de la espectrografía infrarroja mostró resultados diferentes lo cual indica que para la identificación de minerales arcillosos la prueba del grumo no es del todo confiable.

8. La espectroscopía infrarroja permitió determinar que la parte arcillosa de los suelos está compuesta mayoritariamente por los siguientes minerales arcillosos:

Suelo No	Clasificación	Minerales arcillosos
1	MH	Caolinita – clorita - illita
2	ML	Montmorillonita
3	ML	Caolinita – montmorillonita
4	MH	Caolinita

9. Se muestra que a pesar de que los suelos se encuentran ubicados en la misma zona, que pueden tener un origen similar, que su ubicación dista de solo unos pocos kilómetros y su clasificación por medio del sistema unificado es similar, los minerales que los componen son diferentes y por ende su comportamiento es totalmente diferente, razón por la cual no reaccionan de la misma forma a los diferentes procesos de estabilización, lo que hace sumamente importante realizar adecuados estudios de laboratorio con el fin de determinar el estabilizante más adecuado para el tipo de suelo. Los ensayos a realizar dependen de la propiedad que se desee mejorar verificando que el estabilizante seleccionado no afecte otras características del suelo que resulten deseables para su utilización.
10. Con la caracterización química de los suelos se observa que los suelos 1 y 4 presentan un alto contenido de arcillas (40% aproximadamente) lo que aparentemente indica que deben presentar una reacción adecuada a la estabilización con cal, lo cual es corroborado por el hecho de presentar límites de plasticidad superiores al 12% y contener caolinita entre sus minerales arcillosos, lo anterior se comprueba al ser sometido a este proceso de estabilización en donde se logra incrementar la resistencia del suelo 1 en un 290% para contenidos de cal superiores al 6% del peso del suelo; y en el suelo 4 se observan incrementos del 620% para cantidades de cal del 6%, llegando este hasta el 1200% con un 8% de cal, se presenta un mejor resultado en el suelo 4 probablemente por contener caolinita con mayor pureza.
11. En la caracterización química se observa que el suelo 2 (limo de baja plasticidad) está compuesto mayoritariamente por partículas limosas (45%) y que adicionalmente presenta un alto contenido de arenas (36%) lo cual hace que se trate de un suelo que es factible de ser estabilizado con cemento por poseer partículas de mayor tamaño, lo anterior se corrobora por el hecho de poseer un índice de plasticidad del 8%, pero en la espectroscopía infrarroja, se observa que predomina la montmorillonita como mineral arcilloso lo que hace que en teoría se deba estabilizar con cal. Los resultados de estabilización muestran que el suelo responde adecuadamente a los dos estabilizantes, obteniéndose incrementos de resistencia hasta del 1700% con la adición del

- 8% de cal, e incrementos del 1000% con la adición del 8% de cemento. Es decir los mejores resultados de estabilización del suelo 2 se obtienen con la cal.
12. Los suelos 1 y 4 también presentan una adecuada reacción al cemento, con el que se obtienen incrementos de resistencia superiores al 400% para el suelo 4, e incrementos superiores al 300% para el suelo 1, lo anterior se debe probablemente al hecho que la caolinita reacciona adecuadamente con el cemento y permite la obtención de incrementos de resistencia temprana, adicionalmente puede influir en la efectividad del cemento como estabilizante el tamaño de las partículas de estos suelos que corresponden básicamente a limos. Los resultados obtenidos con la cal para el suelo 1 son ligeramente mejores que los obtenidos con el cemento.
 13. La caracterización química de los suelos muestra que el suelo 3 presenta un alto contenido de arenas (81.7%), lo cual indica que debe reaccionar adecuadamente con el cemento, pero este suelo está formado por minerales de caolinita y montmorillonita, los cuales reaccionan favorablemente con la cal, lo anterior se corrobora con el hecho de que la cal permite incrementos de resistencia hasta del 800% y con el cemento los incrementos son del 400%. Es decir los incrementos obtenidos con el cemento son escasamente el 50% de los incrementos obtenidos con la cal.
 14. De acuerdo con lo anterior se deduce que la eficiencia de uno u otro estabilizante, no depende exclusivamente de un parámetro dado y por el contrario debe tenerse en cuenta todos ellos en el momento de seleccionar el estabilizante más adecuado.
 15. La adición de cal o cemento a los suelos 1, 2 y 4 produce una disminución en la deformación unitaria en la falla, lo que quiere decir que la rigidez del suelo se incrementa. Es importante anotar que estos suelos están formados por un 60% o más de partículas de limos o arcillas.
 16. La adición de cal o cemento al suelo 3 produce un incremento en la deformación unitaria en la falla, lo que quiere decir que el suelo presenta una menor rigidez, este suelo está formado principalmente por partículas de arena. Este es un comportamiento anómalo que puede ser investigado con mayor detalle.
 17. En términos generales la adición de cal o cemento producen una disminución en la deformación unitaria en la falla del suelo, lo cual indica que si bien estos materiales producen un incremento en la resistencia, también hacen que el suelo se vuelva más rígido.

18. El dicloruro de sodio, silicato de calcio y el bórax no producen mayores beneficios sobre la resistencia del suelo y por el contrario en algunos casos su presencia resulta nociva.
19. En el suelo 2, cuyo principal mineral arcilloso es la montmorillonita, la adición de cemento y dicloruro de sodio permite incrementar la resistencia del suelo y a la vez aumentar la deformación unitaria en la falla, lo cual hace que el suelo mejore considerablemente sus condiciones ingenieriles, ya que no solamente se consigue un material más resistente sino que también más flexible.
20. El suelo 4, cuyo material predominante es la caolinita, presenta un comportamiento similar al suelo 2 con la adición de cemento y dicloruro de sodio, ya que aumenta la resistencia y la deformación unitaria en la falla.
21. La adición de dicloruro de sodio y cal a los suelos 2 y 4 permite obtener un incremento en la resistencia a la compresión del suelo, y también produce una disminución en la deformación unitaria en la falla.
22. La adición de silicato de calcio y cemento a los suelos 2 y 4 produce un leve incremento en la resistencia de los suelos, pero también hace que la deformación unitaria en la falla disminuya aún más que con el suelo cemento.
23. La adición de silicato de calcio y cal al suelo 2 permite obtener un incremento en la resistencia a la compresión del suelo y a su vez un aumento en la deformación unitaria en la falla.
24. La adición de silicato de calcio y cal al suelo 4 no produce efectos significativos sobre las propiedades del suelo.
25. La adición de texilán 553 y cemento al suelo 2 produce un incremento leve en la resistencia a la compresión y a su vez permite aumentar la deformación unitaria en la falla, mejorando las propiedades elásticas del suelo.
26. La adición de texilán 553 y cemento al suelo 4 produce una disminución en la resistencia a la compresión del suelo.
27. La adición de texilán 553 y cal a los suelos 2 y 4 no produce efectos significativos sobre las propiedades de los suelos.
28. La adición de construcril 1662 y cemento al suelo 2 produce una disminución en la resistencia a la compresión del suelo, pero también produce un aumento de la deformación unitaria en la falla.

29. La adición de construcril 1662 y cal en el suelo 4 produce un incremento leve de la resistencia a la compresión del suelo, pero también reduce considerablemente la deformación unitaria en la falla.
30. En términos generales se puede concluir que la acción de los estabilizantes, o la mezcla de los mismos sobre un suelo u otro debe ser analizada de forma individual, ya que suelos con minerales arcillosos diferentes pueden reaccionar de igual manera a uno o varios productos, o por el contrario suelos con minerales arcillosos similares presentan reacciones diferentes ante los efectos de un mismo proceso de estabilización.
31. La cantidad de estabilizante adicionada puede ser determinante en los resultados que se obtengan, pequeñas cantidades de un producto pueden producir efectos positivos, pero si éstas se incrementan, se obtienen resultados contrarios o viceversa, por lo que es de suma importancia realizar los estudios necesarios para la determinación de las cantidades óptimas de estabilizantes e implementar los debidos controles de calidad en la ejecución del trabajo.
32. Los mejores resultados se obtienen con la adición de cal, con la cual se consiguen considerables incrementos en la resistencia a la compresión, una mayor durabilidad representada en la resistencia a la acción del agua por inmersión y mejora la manejabilidad debido a la reducción del índice de plasticidad del suelo gracias a una disminución del límite líquido y a un incremento en el límite plástico.
33. El cemento utilizado en proporciones adecuadas puede permitir obtener resultados similares a los que se obtienen con la cal.
34. Sin embargo se observa que la cal actúa muy bien en el suelo 2 que corresponde a un limo de baja plasticidad cuyo mineral arcilloso predominante es la montmorillonita, pero también da buenos resultados en el suelo 4 que es un limo de alta plasticidad cuyo mineral predominante es la caolinita, la adición de silicato al suelo dos estabilizado con cal aparentemente permite reducir la cantidad de cal necesaria para mejorar la resistencia del suelo. El cemento permite obtener un incremento en la resistencia de los suelos pero sus efectos son considerablemente menores a los obtenidos con la cal.

8. RECOMENDACIONES

1. La complejidad del análisis del efecto de un estabilizante sobre una familia de suelos, no permite recomendar ningún producto para un tipo de suelo dado, ya que su efecto depende de la cantidad del producto adicionado, los minerales arcillosos existentes, la cantidad de sulfatos y sulfitos presentes en el suelo, la granulometría y el proceso de formación del suelo; por esta razón cuando se emprenda un proyecto de estabilización debe realizarse un estudio completo para seleccionar el producto adecuado que garantice el mejoramiento de la propiedad deseada y la durabilidad del efecto en el tiempo.
2. Durante la ejecución de un proyecto de estabilización de suelos deben implementarse procesos de control de calidad que permitan garantizar un adecuado manejo de los materiales y la verificación de las cantidades óptimas de los estabilizantes en la medida que los trabajos avanzan ya que las propiedades físico-químicas del suelo pueden cambiar en unos pocos kilómetros sin importar que dentro de la clasificación unificada corresponda al mismo material.
3. Debe continuarse la investigación enfocando los nuevos proyectos al análisis químico y dinámico del efecto que producen los estabilizantes que mejor comportamiento presentaron en este estudio, lo anterior con el fin de poder determinar el verdadero efecto del producto sobre el suelo.
4. Debido a las características de los polímeros, debe explorarse su utilidad en el mejoramiento de materiales granulares tipo base, en los que el bajo contenido de finos podría permitir un mejor efecto que el obtenido en los suelos analizados en este estudio.
5. Continuar la investigación enfocándose a la determinación de los efectos de los estabilizantes sobre las propiedades químicas de los suelos con el fin de poder determinar el tipo de reacción que presentan los estabilizantes no convencionales sobre los suelos estabilizados con ligantes hidráulicos.
6. Se debe profundizar en el análisis del efecto que producen el dicloruro de sodio o el silicato de calcio en los suelos estabilizados con cal y cemento ya que aparentemente estos productos pueden resultar benéficos en la resistencia de los suelos.

BIBLIOGRAFIA

- 📖 BADILLO, Juárez. RODRÍGUEZ, Rico. Mecánica de Suelos, Tomo 1, Fundamentos de Mecánica de Suelos, Editorial Limusa, S.A. de C.V. México D.F, 1997.
- 📖 BERRY, Peter L, REID, David. Mecánica de Suelos. Mc Graw Hill. Santa Fe de Bogotá Colombia, 1997.
- 📖 CEMEX Concretos, Catálogo de pavimentos de concreto. Colombia. 2002
- 📖 DE LA FUENTE LAVALLE, Eduardo. suelo – cemento Usos, propiedades y aplicaciones. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.. México, 1995
- 📖 DORFMAN, Boris Estabilización de Suelos Ministerio de obras publicas y Transporte Universidad del Cauca Popayán, Septiembre 1988
- 📖 FERNÁNDEZ LOAIZA, Carlos Mejoramiento y estabilización de suelos, Balderas 95 Primer piso Editorial Limusa, primera edición México, 1982
- 📖 Ficha técnica Texilán 553, Andercol S.A., Medellín, 1988
- 📖 Ficha técnica Construcril 1662, Andercol S.A., Medellín, 1988
- 📖 GUPTA, R.K, BHUMBLA D. F and I. P. Abrol Central soil salinity Reserch Institute Karnal India Received for publicatio 12 april 1982
- 📖 HERNÁNDEZ CARRILLO, Michael, QUIROGA CORSO, Victor M, BETANCOURT Luis A. Caracterización dinámica de suelos estabilizados con ligantes hidráulicos. Tesis de grado, Universidad del Cauca Maestría en Ingeniería Civil. Popayán. 1997.
- 📖 HIGUERA, Carlos Hernando. Estabilización de suelos, Notas de Clase Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil; Instituto de Posgrados en Ingeniería Civil, Popayán Colombia, 1997.
- 📖 H.M. Greaves BSc (Hons), Ceng, MICE. Stabilisation Services Manager, Buxton Lime Industries. Lime Stabilisation. Thomas Telford, London, 1996

- 📖 LAMBE, T William. WHITMAN, Robert V. Mecánica de Suelos. Instituto Tecnológico de Massachussets. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México D.F. 2001
- 📖 Lime Stabilization Construction. National Lime Association 4000 Brandy St N.W Washington, D.C.20016
- 📖 LONDOÑO N, CIPRIANO A. Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto. Medellín. Piloto S.A. Editorial. 2001
- 📖 POLANCO, Margarita Mecánica de Suelos.
- 📖 Portland cement Association Soil cement. Laboratory Handbook .
- 📖 RICO, A y OROZCO J. El efecto de la incorporación de finos en el comportamiento de materiales para base. V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Buenos Aires, 1975
- 📖 RIVERA LOPEZ, Gerardo A. Concreto simple, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Popayán, 1992.
- 📖 SALAZAR RODRÍGUEZ, Aurelio. Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. México D.F, 1995.
- 📖 SANTONI Rosa L, TINGLE, Jeb S, NIEVES Miguel. Accelerated Strenght Improvement of Silty sand using nontraditional additives. Estados Unidos, 2002.
- 📖 -----Stabilizationof clay soils with nontraditionaladditives. Estados Unidos, 2002.
- 📖 SMITH, J. H Consultant to Powerbetter Developments Ltd, Lime Stabililisation. Thomas Telford, London, 1996
- 📖 Sodium Calcium Exchange equilibra in soils as effected by calcium carbonate and organic matter
- 📖 TORRENTE M. y SAGÜES L. Estabilización de suelos. Suelo-cemento. Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona, 1968
- 📖 TORRES, CAICEDO, Cruz Marina. Química aplicada a los pavimentos, Notas de clase, Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil Posgrado de ingeniería de Vías Terrestres. Popayán, 2001

----- Informe de Química sobre los ensayos realizados dentro de estudio de utilización de un polímero en la estabilización de suelos finos con cemento. Universidad del Cauca. Popayán. 2002