

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico. Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión:

- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realísimamente su calidad en el diseño efectuado.
- Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, sustituyéndolo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización.

La siguiente lista de tipos de procedimientos reúne los más usuales:

Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.

Estabilización por drenaje

Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrólisis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejores conocidos.

Estabilización por medio de calor y calcinación.

Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte solo aplicable a un número limitado de tipos de ellos; en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelo, a veces con variaciones de alguna significación, habiendo de renunciar correspondientemente al empleo del procedimiento óptimo en cada clase.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse.

Solo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

Frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias propiedades de los suelos, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización solo como una medida correctiva; alguno de los mejores usos de estas técnicas representa más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles a desarrollarse.

1.2. Situación problemática

Se conoce como suelos expansivos, a los suelos que sufren procesos de expansión y contracción. Estas acciones generan constante inestabilidad en las obras civiles.

La utilización de estos suelos requiere condiciones especiales, desde el punto de vista de la ingeniería. Los problemas que se presentan en estos suelos son más que todo derivados por los cambios de humedad.

Los suelos expansivos, son un factor muy importante a tomar en cuenta en la fundación de las capas de un pavimento, pero muchas veces no se toma en cuenta, ocasionando que en un futuro pueda haber fallas por inestabilidad volumétrica de dicha capa ocasionando problemas en la carpeta de rodadura y fallas de la misma.

La relación de contenido de humedad y estabilidad volumétrica van muy ligadas, ya que depende de esta relación el evitar posibles fallas, debido a que los suelos expansivos tienden a variar su volumen con el aumento o disminución del contenido de humedad de dicho suelo.

La variación del contenido de humedad en un suelo expansivo, hace variar la resistencia del mismo ocasionando fallas e inestabilidad.

La perspectiva de solución es “Estudiar” con esta perspectiva; se prevé conocer un poco más el comportamiento de los suelos expansivos y cómo poder obtener una mayor y mejor estabilidad volumétrica; por ende, una mejora en la durabilidad usando aditivo (cemento), para poder aumentar ciertas características de este suelo y nos ayuden a tomar mejores decisiones al momento de solucionar problemas que se ven en obra.

1.2.1. Problema de investigación

¿De qué manera, el estudio de la aplicación de aditivos (cemento), incidiría en las acciones físicas, químicas y mecánicas de los suelos expansivos?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Se busca soluciones viables y fáciles de realizar en campo en cuanto a obtener estabilidad en suelos expansivos usando aditivo (cemento), ver como este aumenta algunas características beneficiosas del suelo y cómo enfrenta ciertas inclemencias como ser temperaturas extremas, aguas agresivas, cargas y fricción.

Para esto se realizó el estudio en un suelo expansivo tipo CL, que se extrajo de la zona de la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

Se prevé estudiar los suelos expansivos con uso de aditivo en un tiempo establecido de 10 semanas. Se utilizarán los instrumentos y equipos que cuenta el laboratorio de suelos de la carrera de Ing. Civil de la U.A.J.M.S. para la realización del trabajo de investigación.

La muestra será obtenida del distrito 10 zona “El Portillo” en inmediaciones de la nueva terminal de buses “Agustín Morales Alvares” de la ciudad de Tarija.



Foto N°1: Ubicación de la zona de extracción de suelo

1.3. JUSTIFICACIÓN

Se prevé estudiar las acciones físicas, mecánicas y químicas que sufre un suelo expansivo con la adición de aditivo (cemento).

Acciones físicas:

Ver qué pasará al congelar y descongelar la muestra.

Acciones mecánicas:

Exponer la muestra a cargas y sobrecargas y ver cómo reacciona ante dichas acciones.

Verificar la adherencia de muestra realizando un raspado de la misma.

Acciones químicas:

Verificar cómo las aguas agresivas afectan a la muestra.

Al realizar todos estos estudios se quiere tener un poco más de conocimiento respecto al uso de aditivo; cemento, en suelos expansivos y si son beneficiosos o no en dicho suelo y qué características del mismo se ven afectadas, cuándo es recomendable usarlo o cuándo no.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Estudiar el comportamiento de un suelo expansivo, mediante la adición de cemento tipo IP-30 en diferentes porcentajes con el fin de determinar las variaciones debido al interperismo, aguas agresivas, resistencia a compresión simple y adherencia de dicho suelo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Definir y caracterizar el banco de suelo utilizado en la investigación.
- Determinar los porcentajes de cemento utilizados.
- Realizar el estudio de resistencia a compresión simple y adherencia de un suelo expansivo, realizando los ensayos de laboratorio correspondientes.
- Establecer una comparación técnica de la influencia del uso de cemento en suelos expansivos con los datos obtenidos en laboratorio.
- Presentar una tabla de resumen de resultados obtenidos, con sus respectivas gráficas de comparaciones.

1.5. HIPÓTESIS

Si, se realiza los distintos ensayos de laboratorio, obteniendo los resultados para diferentes tipos de variables del suelo estudiado (variación del % de aditivo utilizado), entonces podemos identificar el comportamiento de los suelos expansivos y los cambios que sufren las acciones físicas, químicas y mecánicas de dichos suelos.

1.6.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

1.6.1. Variable independiente

La variación del porcentaje de cemento en la muestra.

1.6.2. Variable dependiente

Densidad

Contenido de humedad

Expansión

Adherencia

Resistencia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El presente trabajo sigue una línea de investigación causal.

1.8. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

1.8.1. Unidad de estudio

Estudio del comportamiento de suelo expansivo en laboratorio con y sin el uso de aditivo cemento, realizando diferentes tipos de ensayos en el mismo.

Tabla 1. Cantidad de ensayos de laboratorio

Granulometría	12
Límite Líquido	14
Límite Plástico	14
Desgaste	24
Densidad	12
Rotura de probetas	72
Congelamiento y deshielo	24
Agua agresiva	24
Total	196

Fuente: Elaboración propia

1.8.2. Población

Se estableció una población de 196 ensayos.

1.8.3. Muestra

$$n = \frac{\sum_{i=1}^l N_i P_i q_i}{ND + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^l N_i P_i q_i}$$

$$D = \frac{E^2}{Z^2} \quad W_i = \frac{N_i}{N} \quad n_i = W_i n$$

Tabla 2. Tamaño y muestra

Grupos	Ni	Pi	qi	Pi x qi	Pi x qi x Ni	Wi	ni
Granulometría	12	0,5	0,5	0,25	3,0	0,0612244	8
Límite Líquido	14	0,5	0,5	0,25	3,5	0,0714285	9
Límite Plástico	14	0,5	0,5	0,25	3,5	0,0714285	9
Desgaste	24	0,5	0,5	0,25	6,0	0,1224489	16
Densidad	12	0,5	0,5	0,25	3,0	0,0612244	8
Rotura	72	0,5	0,5	0,25	18,0	0,3673469	48
Congelamiento y deshielo	24	0,5	0,5	0,25	6,0	0,1224489	16
Agua agresiva	24	0,5	0,5	0,25	6,0	0,1224489	16
	193				49,0		130

Fuente: Elaboración propia

$$n = 129,8357$$

$$n = 130 \text{ ensayos}$$

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

Para la muestra se escogió el método probabilístico.

Cálculo de muestra estratificada por afijación proporcional.

1.10. Métodos y técnicas empleadas

1.9.1. Métodos

El trabajo sigue la línea de un método lógico de análisis, con una perspectiva de estudiar, para lo cual se realizaron ensayos de laboratorio para adquirir conocimiento, asimilar los datos, estudiarlos y entenderlos.

1.9.2. Técnicas

Para esto se emplearon prácticas de laboratorio listadas a continuación:

- Granulometría
- Límites de consistencia
- Compactación
- Armado de probetas suelo cemento
- Congelamiento deshielo de probetas
- Análisis de aguas agresivas en probetas
- Rotura de probetas a compresión simple
- Desgaste de probetas

1.10. Procesamiento de la información

Se procedió a realizar tablas con los datos obtenidos, para luego realizar sus comparaciones respectivas, realizando un análisis de los mismos y así poder determinar qué es lo que estaba pasando después de realizar cada una de las pruebas de laboratorio y poder definir los resultados de las pruebas realizadas.

1.11. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Con el presente trabajo de investigación se quiere estudiar el comportamiento de los suelos expansivos tipo CL con aplicación de aditivo cemento en diferentes porcentajes (3%, 5% y 8%), analizar qué ocurre con la muestra de suelo con y sin aditivo realizando diferentes ensayos de laboratorio:

- Relaciones humedad-peso unitario de mezclas de suelo cemento.

- Preparación en el laboratorio de probetas de suelo cemento.
- Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento.
- Ensayo de durabilidad por congelamiento y deshielo para mezclas suelo-cemento.
- Ensayo de adherencia para mezclas suelo-cemento.

Con esto conocer un poco más cómo actúa el suelo bajo cierto régimen que afecte sus acciones físicas (congelamiento/deshielo), químicas (aguas agresivas) y mecánicas (resistencia y adherencia). Así podremos establecer una relación entre un suelo con aditivo cemento y otro sin aditivo, ver qué propiedades mejoran en dicho suelo y cómo este es afectado en su comportamiento para poder dar soluciones viables y rápidas en obra respecto a estos fenómenos que no son muy estudiados en cuanto a temas de estabilización.

Se quiere conocer si la aplicación de cemento es realmente beneficiosa o no en cuanto el suelo sea sometido a los ensayos de laboratorio, para determinar si es recomendable el uso de este agente estabilizante en ciertas situaciones, o si es mejor recomendar otro tipo de estabilizante para ciertos casos o simplemente cambiar de tipo de estabilización.

1.12. Productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva

Con el estudio del comportamiento de suelos expansivos usando aditivo (cemento), se espera dar solución a algunos problemas en obra, como ser, cuándo usar cierto tipo de aditivo, cuándo es recomendado el uso del mismo y cuándo no se lo recomienda, qué propiedades mejorarán o si es mejor cambiar el tipo de suelo para ciertas obras civiles.

1.12.1. Resultados esperados

Se espera tener un mayor conocimiento del comportamiento de los suelos expansivos, en cuanto a cómo se ven afectados al interperismo, aguas agresivas y a la aplicación de cargas con el uso de aditivos y sin el uso del mismo.

1.13. Marco normativo

Las pruebas de laboratorio realizadas se rigieron bajo los Manuales Técnicos para el Diseño de carreteras en Bolivia. Estos manuales se realizaron bajo el marco del proyecto “Elaboración y Actualización de los Manuales Técnicos de Diseño Geométrico, Diseño de Obras de Hidrología y Drenaje, Dispositivos de Control de Tránsito y Ensayos de Suelos y Materiales, para Carreteras” para la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

El contenido está constituido por normas y procedimientos que no deben cambiarse bajo ninguna circunstancia. En especial, los ensayos de laboratorio deben ajustarse exactamente a los procedimientos y criterios que se indican. Cualquier alteración de los mismos obliga a anular el resultado obtenido, pues imposibilita su comparación con otras especificaciones y resultados obtenidos de otros ensayos.

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422, AASHTO T88).

Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318, AASHTO T89).

Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318, AASHTO T90).

Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos-método estándar (ASTM D698, AASHTO T99).

Compresión incofinada en muestras de suelos (ASTM D2126, AASHTO T208).

Relaciones humedad-peso unitario de mezclas de suelo cemento (ASTM D558).

Preparación en el laboratorio de probetas de suelo cemento (ASTM D1632).

Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento (ASTM D1633).

Ensayo de durabilidad por congelamiento y deshielo para mezclas suelo-cemento (VN-E22-66).

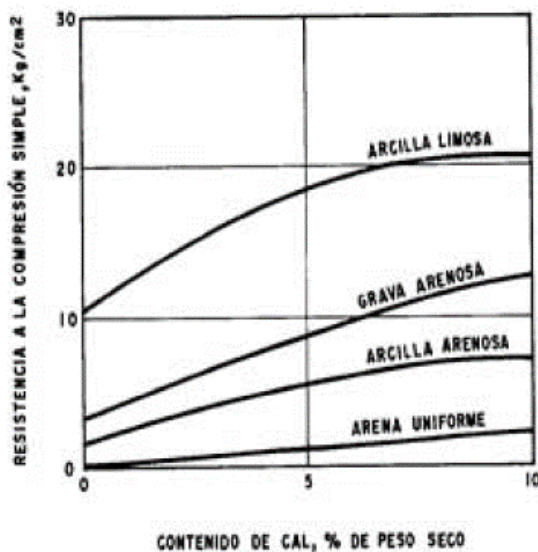
Ensayo de adherencia para mezclas suelo-cemento (VN-E22-67).

1.14. Análisis económico

Se realizará una comparación económica entre aditivos usados en suelos expansivos, como ser la cal y emulsión asfáltica. Para proceder a comparar con el aditivo usado en este proyecto de tesis.

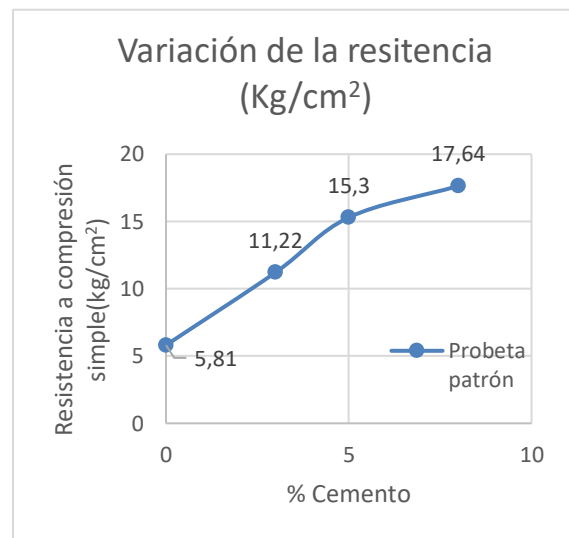
Se tiene las gráficas de resistencia a compresión simple, para proceder a comparar las resistencias alcanzadas con los aditivos mencionados.

Figura N°1: Resistencia a compresión simple suelos estabilizados con cal.



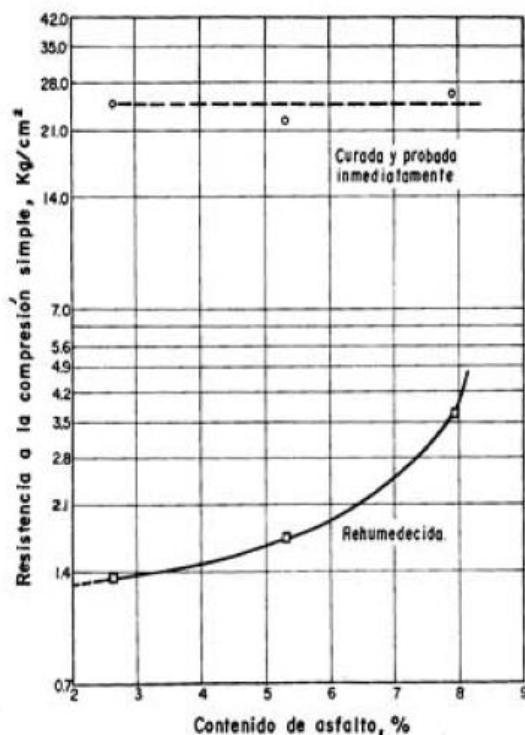
Fuente: La Ingeniería de suelos en las vías terrestres aeropistas Vol. 2 Pág. 531.

Figura N°2: Variación de la resistencia a compresión mezcla suelo cemento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°3: Resistencia a compresión simple mezcla emulsión asfáltica con suelo



Fuente: La Ingeniería de Suelos en las vías terrestres aeropistas Vol. 2 Pág.539.

De las gráficas podemos observar la resistencia a compresión simple para suelos estabilizados con cal, emulsión asfáltica y cemento.

Tabla 3. Comparación de la resistencia a compresión simple (kg/cm²)

Aditivo	3%	5%	8%
Cal	16,00	18,50	20,50
Cemento	11,22	15,30	17,64
Emulsión	1,40	1,80	3,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Precio de referencia de aditivos

1 kg. Cal	1,50 Bs.
1 kg. Cemento	0,90 Bs.
1 kg. Emulsión	16,00 Bs.

Fuente: Elaboración propia

Como podemos ver, la cal es la mejor opción en cuanto a obtener resistencias mayores referentes a otros tipos de aditivos, aunque el precio sea un poco más elevado.

Pero viendo el análisis del tema de tesis que se orienta a la durabilidad de suelos expansivos estabilizados, se considera como mejor estabilizante el cemento por sus propiedades ligantes e impermeabilizantes, que nos brindarán una mayor resistencia en cuanto el suelo estabilizado sea sometido a pruebas de congelamiento deshielo, aguas agresivas y adherencia, ya que un material estabilizado con cemento es mucho más impermeable que uno estabilizado con cal, lo que no permitiría tan fácilmente el paso de aguas agresivas a través de este suelo.

Referente al costo del estabilizante sería también este el más económico.

1.15. Grado de aplicación

El grado de aplicación de la propuesta viene orientado a la zona alta de Bolivia. Como los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí, ya que en estos departamentos la mayor parte del tiempo tienen temperaturas bajo 0°C, como también sus suelos tienen gran contenido de materiales agresivos que vienen dados por la minería en dichos Departamentos, siendo el más propenso a estos materiales agresivos el Departamento de Potosí.

1.16. Justificación del porcentaje de aditivo usado para el proyecto

Tabla 5. Contenido típico de cemento para varios tipos de suelos

Tipo de suelo	Porcentaje de cemento, en peso
Material triturado de roca	0,5 - 2
Gravas areno-arcillosas bien graduadas	2 - 4
Arenas bien graduadas	2 - 4
Arenas uniformes	4 - 6
Arcilla arenosa	4 - 6
Arcilla limosa	6 - 8
Arcilla	8 - 12
Arcilla muy activa	12 - 15
Suelos orgánicos	10 - 15

Fuente: La Ingeniería de suelos en las vías terrestres aeropistas Vol. 2 Pág.507.

Como se puede observar en la tabla, el porcentaje máximo de cemento para un suelo arcilla es del 8% - 12%.

Tabla 6. Porcentaje de cemento a probar inicialmente en diferentes tipos de suelos

Suelo	Porcentaje de cemento, en peso, usualmente requerido por la capa terminada.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de compactación.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de durabilidad.
GW, GP, GM y SW	3 – 8	5 – 6	3 – 7
SC, GC	5 – 9	7	5 – 9
SP, SM	7 – 11	9	7 – 11
ML	7 – 12	10	8 – 12
CL, OL, MH	8 – 13	10	8 – 12
CH	9 – 15	12	10 – 14
OH, P _t	10 – 16	13	11 – 15

Fuente: La Ingeniería de suelos en las vías terrestres aeropistas Vol. 2 Pág.526.

Como podemos ver, para un suelo CL y para pruebas de durabilidad los porcentajes máximos de cemento son de 8% - 12%.

CAPÍTULO II

SUELOS EXPANSIVOS Y SUS PROPIEDADES CON USO DE ADITIVOS

2.1. SUELOS EXPANSIVOS

Se conoce como suelos expansivos, a los suelos que sufren procesos de expansión y contracción. Estas acciones generan constante inestabilidad en las obras civiles.

La utilización de estos suelos requiere condiciones especiales, desde el punto de vista de la ingeniería. Los problemas que se presentan en estos suelos son más que todo derivados por los cambios de humedad.

Los suelos expansivos son un factor muy importante a tomar en cuenta en la fundación de las capas de un pavimento, pero muchas veces no se toma en cuenta, ocasionando que en un futuro pueda haber fallas por inestabilidad volumétrica de dicha capa ocasionando problemas en la carpeta de rodadura y fallas de la misma.

La relación de contenido de humedad y estabilidad volumétrica van muy ligadas, ya que depende de esta relación el evitar posibles fallas, debido a que los suelos expansivos tienden a variar su volumen con el aumento o disminución del contenido de humedad de dicho suelo.

La variación de cantidad de un suelo expansivo, hace variar la resistencia del mismo dependiendo del contenido de humedad y como varíe este dentro del suelo, ocasionando fallas e inestabilidad.

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algunos sentidos los suelos a utilizar para un determinado fin, en un lugar específico.

Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión.

- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realísimamente su calidad en el diseño efectuado.
- Eliminar el material insatisfactorio o prescindiendo de usarlo, sustituyéndolo por otro de características adecuadas.

- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian son:

Estabilidad volumétrica

Resistencia

Permeabilidad

Compresibilidad

Durabilidad

Frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de estas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras.

2.1.1. Estabilidad volumétrica

La expresión se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con la variación estacional o con la actividad del ingeniero.

Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva en una masa rígida, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones de expansión. Esto se logra con tratamientos térmicos o químicos; la experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

2.1.2. Resistencia

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos, como uno de sus objetivos más comunes. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar la resistencia son las siguientes:

Compactación

Vibroflotación

Precarga

Drenaje

Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.

Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

2.1.3. Permeabilidad

Se dice que es un material permeable cuando contiene vacíos continuos. Como tales vacíos existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactadas, el granito sano y la pasta de cemento, dichos materiales son permeables.

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, inyección, etc.

En materiales arcillosos, el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

2.1.4. Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad.

La compresibilidad es una propiedad la cual hace que todos los cuerpos disminuyan de volumen al someterlos a una presión o compresión determinada.

2.1.5. Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al interperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

En la práctica actual se echan de menos criterios de campo o de laboratorio que permitan establecer con seguridad cual va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y este es un motivo que contribuye poderosamente a que el concepto de durabilidad sea hoy de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente. (La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Vol 2,1977).

2.2. FUNDAMENTOS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de un suelo es un proceso que tiene por objeto aumentar su resistencia a la deformación, disminuir su sensibilidad al agua, controlar la erosión y los cambios de volumen, etc.

Con ello se pueden aprovechar suelos mediocres e incluso francamente inadecuados en el cimiento de los firmes.

La estabilización puede ser mecánica, por mezclas de dos o más suelos de diferentes características, a fin de obtener un suelo de características suficientes en cuanto granulometría, plasticidad, permeabilidad o impermeabilidad, etc. Uno de los suelos es el existente en la traza y el otro es de aportación para mejorar sus propiedades. Se trata de una técnica de posibilidades muy limitadas y que en la actualidad se utiliza solo en vías de baja intensidad de tráfico.

Más a menudo la estabilización se lleva a cabo incorporando aditivos que actúan física o químicamente sobre las propiedades del suelo. Los más utilizados son el cemento y la cal, pero también se emplean escorias granuladas, cenizas volantes, ligantes hidrocarbonados fluidos, cloruro sódico, cloruro cálcico, etc.

En los procesos de estabilización con aditivo, el grado de estabilización que puede alcanzarse depende fundamentalmente del tipo de suelo, del aditivo utilizado, de la cantidad añadida (aunque algunos suelos de buena granulometría y reducida plasticidad pueden resultar muy modificados aun con proporciones muy bajas de aditivo) y, muy especialmente, de la ejecución. Cuando se trata únicamente de mejorar ligeramente las propiedades de un suelo por adición de una pequeña cantidad de un aditivo, es usual hablar de <<suelo mejorado con...>>; en cambio, la mezcla que ofrece finalmente una resistencia y rigidez apreciables suele designarse como <<suelo estabilizado con...>>.

Las técnicas de estabilización propiamente dicha se aplican no solo en formación de explanadas, sino también para construir capas de firme, en cuyo caso a veces se emplean los mismos suelos de la traza, pero en otras ocasiones se recurre a suelos de préstamos. Cuando la mezcla se va a destinar a capas de firme suele, en general, realizarse en central, mientras que para la formación de explanadas se realiza *in situ*.

2.2.1. Aditivos usados en suelos expansivos

2.2.1.1. Suelo – Suelo

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina.

El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy sergables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que

puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas. (La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Vol. 2,1977).

2.2.1.2. Suelo – Aceite sulfonado

Los aceites sulfonados y lignosulfonados se basan en la estabilización electroquímica, los cuales permiten un intercambio de iones entre el agua ionizada por el aceite y el suelo. Esta clase de aceites son de origen orgánico derivados de la combinación sulfuros y ácidos, aunque también hay otros que pueden ser parte de un derivado del grupo naftaleno del petróleo, como es el caso de Geo-stab. Los aceites lignosulfonados reciben este nombre porque provienen de un compuesto orgánico como la lignina y se obtienen mediante el proceso del sulfito de madera.

El uso de aceites sulfonados y lignosulfonados tiene como ventajas la reducción del agua contenida dentro de las partículas de suelo facilitando así la compactación; por medio de su acción catalizadora separa los iones H y OH liberando hidrógenos con cargas negativas y positivas y atrae iones de cargas positivas, además sus propiedades electrodinámicas reducen y fraccionan la doble capa aglomerando las partículas de suelo y disminuyendo la capacidad de hinchamiento.

Las dosificaciones del aceite dependen de su origen y concentración, pero es importante tener en cuenta que independientemente del producto que se utilice se sugiere un periodo de curado necesario para que el intercambio de iones se lleve a cabo. (Estavias, 2004)

2.2.1.3. Suelo – Cemento

Los suelos mejorados con cemento son materiales que cabe seguir calificando como suelos, aunque con menor sensibilidad a la acción del agua y mayor capacidad de soporte que los suelos de partida. Éstos suelen ser los mismos de la traza; se trata, pues, de una técnica destinada fundamentalmente a conseguir explanadas de calidad suficiente aprovechando suelos algo plásticos.

La mezcla se realiza siempre *in situ*, empleándose proporciones de cemento que, en general, no superan el 3% sobre la masa seca del suelo. La calidad final del material depende de dos factores: la calidad del suelo y la proporción de conglomerante añadido.

Por su parte, el material denominado propiamente suelo estabilizado con cemento se obtiene por mezcla de un suelo granular, suficientemente disgregado, con cemento, agua y eventuales adiciones seguido de una compactación y de un curado adecuado. De esta forma, el material suelto de partida se convierte en otro rígido mucho más resistente. A diferencia de los hormigones, sin embargo, los granos del suelo no están envueltos en pasta de cemento, sino que están puntualmente unidos entre sí, por lo que este material tiene una resistencia y un módulo de elasticidad moderados. Las propiedades finales dependen de:

El tipo de suelo y las proporciones de cemento y de agua.

El proceso de ejecución.

El curado y la edad de la mezcla compactada.

Este material se emplea en la formación de explanadas de alta calidad. Debe tener una resistencia apreciable a compresión simple (por ejemplo, no menos de 1,5 MPa a los siete días).

En todo caso, la cantidad de cemento necesaria para obtener un material suficientemente resistente es muy variable, dependiendo del tipo de suelo. Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares con finos de plasticidad reducida (tipos A-1, A-2 y A-3 de la clasificación AASHTO), con los que son necesarias proporciones de cemento que pueden ir del 3% al 8% sobre la masa seca del suelo, aunque habitualmente no suele sobrepasar el 6%. En todo caso, la dosificación precisa de cemento ha de fijarse en laboratorio mediante ensayos de resistencia o de durabilidad sobre probetas con diferentes contenidos de cemento.

El contenido más apropiado de agua se determina mediante el ensayo Proctor modificado. Hay que tener en cuenta que cuando más alta es la densidad alcanzada, mayor es la resistencia del material. Al añadirle cemento al suelo de partida, y antes de

iniciarse el fraguado, su índice de plasticidad disminuye y la densidad máxima y la humedad óptima varían ligeramente en un sentido u otro según el tipo de suelo. Los suelos estabilizados con cemento para la formación de explanadas pueden mezclarse *in situ* (es lo habitual) o en central (en determinados casos). (Ingeniería de Carreteras, Vol. 2,2004).

2.2.1.4. Suelo – Cal

La estabilización de suelos con cal se obtiene por mezcla de suelo, cal aérea (viva o apagada) y agua. Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina, de plasticidad apreciable y, en particular, de elevada humedad natural. Según el tipo de suelo, se emplean porciones (sobre la masa seca del suelo) del 2% al 7 % de cal, si bien no se suele sobrepasar el 5%.

Al mezclar el suelo con cal, se produce una reacción rápida de floculación e intercambio iónico seguida de otra lenta de tipo puzolánica, con formación de nuevos productos químicos. La sílice y alúmina de las partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles.

Uno de los efectos más importantes de la cal en un suelo es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Con suelos de baja plasticidad ($IP < 15$) aumentando tanto el LL como el LP y también, muy ligeramente, su IP; en cambio, en suelo de plasticidad media y elevada ($IP > 15$) disminuye el IP. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite la densificación de suelos de elevada humedad natural que, de otro modo, no permitirían la construcción del firme sobre ellos.

Otra de las características de las estabilizaciones con cal es que su densidad máxima Proctor es inferior a la del suelo de partida debido al bajo peso específico de la cal.

Sin embargo, esto no tiene mayor trascendencia dado que su resistencia al esfuerzo cortante es muy superior y aumenta con la proporción de cal añadida, el tiempo transcurrido, la temperatura de curado y disgregación conseguida en el suelo durante la ejecución.

Con la adición de cal, el suelo se vuelve más friable y granular. El aumento del límite plástico y el de la humedad óptima de compactación permiten su puesta en obra con una mayor facilidad. A veces, la mezcla se realiza en dos fases, con un período intermedio de reacción de uno a dos días. (Ingeniería de Carreteras, Vol. 2,2004).

2.2.1.5. Suelo – Cenizas volantes

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en estas depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo al igual que otras sustancias reducen el índice de expansión.

Una concentración del 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales.

2.3. PROPIEDADES DE SUELO – CEMENTO

Las propiedades fundamentales que se buscan en los suelos estabilizados con cemento son:

Una resistencia mecánica correcta, en el caso de suelos estabilizados.

Una durabilidad suficiente: Estabilidad química y volumétrica, resistencia a la meteorización.

2.3.1. Estabilidad volumétrica

Mejora el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad. Habitualmente, en los materiales y suelos granulares no cohesivos no se

producen cambios dimensionales apreciables por las variaciones en el contenido de humedad.

En cambio, los suelos arcillosos con su contenido óptimo de humedad y compactados a su densidad máxima experimentan hinchamiento al aumentar el contenido de humedad, mientras que por el contrario sufren una retracción al disminuir la misma.

Si se compactan con contenidos de humedad superiores al óptimo, el hinchamiento es menor y la retracción es mayor; mientras que, si la humedad de compactación es inferior a la óptima, el hinchamiento es mayor y la retracción es menor.

La incorporación de cemento a este tipo de suelos reduce los cambios de volumen provocados por las variaciones de humedad a valores de un cuarto a un medio de los originales, porque la matriz de cemento tiende a coartar los movimientos del suelo, la disminución de los mismos aumenta al crecer el contenido de cemento.

La mezcla con cemento también reduce las dilataciones por efecto de las heladas en los suelos susceptibles a las mismas.

2.3.2. Durabilidad

Mayor durabilidad, aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera eficaz a los cambios climatológicos y al uso de tráfico.

Una mezcla durable es aquella que puede resistir en forma satisfactoria las condiciones de servicio a que estará sujeta, tales como: la meteorización, la acción química y el desgaste.

Es indispensable que resista, sin deteriorarse con el tiempo, las condiciones para las cuales se ha proyectado. La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesta la mezcla suelo-cemento, o a causas internas de la misma. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataque por líquidos y gases de origen naturales o industriales.

El grado de deterioro producido por estos agentes dependerá principalmente de la calidad del cemento. Las causas internas son: la reacción agregado-álcali, cambios de volumen debido a diferencias entre las propiedades térmicas y sobre todo la permeabilidad, este factor determina en gran medida la vulnerabilidad de la mezcla ante los agentes externos.

2.3.2.1. Comportamiento frente a heladas

El fraguado y primer endurecimiento de los materiales tratados con cemento pueden verse retrasados e incluso detenidos cuando los mismos tienen lugar en periodo de heladas, debido entre otras causas, a las acciones expansivas del agua intersticial, que impide la evolución normal de estos procesos.

En algunos casos, la formación de hielo puede dar lugar a una descompactación del material. Salvo en estas circunstancias, el proceso de fraguado se continúa desarrollando una vez que la temperatura alcanza valores normales.

Debido a estos problemas potenciales, en épocas frías lo mejor es suspender la puesta en obra cuando se prevean bajas temperaturas, siendo lo más deseable que la temperatura de la superficie tratada no baje de 2°C durante las primeras 72 horas. En caso de que, por la programación de las obras, sea necesario continuar las mismas, habrá que adoptar las precauciones usuales (calentamiento del agua, protección de las superficies, etc.). Es recomendable utilizar en estos casos cementos con el mayor contenido posible de clinker.

2.3.2.2. Comportamiento frente a agentes agresivos

En los terrenos y aguas subterráneas con yeso u otros sulfatos (sodio, magnesio o potasio) puede producirse un ataque de los mismos a las mezclas con cemento. Dicho ataque puede ser de varias formas, pero el más peligroso se produce al reaccionar los sulfatos con el aluminato tricálcico que se forma durante la hidratación del cemento, lo que da lugar a cristales de sulfoaluminato tricálcico hidratado, también conocido como ettringita.

Esta reacción es muy expansiva y puede llevar a la desintegración del tratamiento con cemento. La rapidez y la importancia de estos ataques aumentan a medida que se incrementan la concentración de los sulfatos en las aguas subterráneas o en el propio suelo. Los efectos de los ataques de los sulfatos, que son tanto menores cuanto más compacta e impermeable es la mezcla, pueden también reducirse empleando cementos resistentes a los sulfatos.

No obstante, en algunas ocasiones el conjunto de suelo con alto contenido de sulfatos-cemento sulforesistentes puede dar lugar a ettringita. El daño que se produce es enorme y la solución normalmente muy costosa, por lo que se requiere un estudio especial cuando la presencia de sulfatos solubles es superior al 1% en peso en el suelo.

2.3.3. Permeabilidad

La reducción de la permeabilidad disminuye la circulación de agua, mejorando la estabilidad.

La penetración de materiales en solución puede afectar adversamente la durabilidad de la mezcla suelo-cemento, como por ejemplo cuando se efectúan ataques de líquidos agresivos.

Esta penetración depende de la permeabilidad de la mezcla suelo-cemento y está determinada por la facilidad relativa con que la mezcla puede saturarse de agua, por lo tanto, la permeabilidad se asocia mucho a la vulnerabilidad, a la congelación, lo cual puede dar origen a grietas, descascaramientos y pérdida de adherencia.

La permeabilidad no es solamente función de su porosidad, sino que depende también del tamaño, la distribución y la continuidad de los poros. La permeabilidad se ve afectada por las propiedades del cemento.

Una mezcla de buena gradación de los agregados, manejable y bien compactada es casi impermeable, por lo tanto, muy durable.

2.3.4. Densidad

Al igual que en los suelos, los materiales tratados con cemento tienen una curva densidad seca-húmeda, antes de la hidratación del conglomerante, que se obtiene aplicando una energía de compactación normalizada a distintas muestras del mismo material de partida en las que se va variando su contenido de humedad.

Dicha curva suele tener una forma aproximadamente parabólica, con una densidad máxima para un contenido de humedad que se denomina humedad óptima.

Dependiendo de la energía aplicada se obtienen diferentes curvas, las cuales tienden asintóticamente a la denominada curva de saturación del material, la cual relaciona la densidad seca con la humedad cuando el volumen de vacíos de aire es nulo.

Los ensayos más usuales para obtener una curva humedad-densidad son los siguientes:

- Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos – Método estándar (ASTM D698 AASHTO T99).
- Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos – Método modificado (ASTM D698 AASHTO T180).

Tanto en el ensayo Proctor normal como en el modificado se deja caer una maza de características normalizadas desde una altura fija un cierto número de veces en cada una de las capas en las que se compacta el material.

La energía que se aplica al material es 4,5 veces superior en el método Proctor modificado en comparación con la del Proctor normal. Por ello la densidad máxima Proctor normal es inferior a la del Proctor modificado, mientras que la humedad óptima es superior.

Los métodos anteriores se utilizan asimismo para confeccionar probetas para el control de resistencias. Ya se ha mencionado la gran dependencia entre estas últimas y la densidad.

En general, los valores de la densidad máxima y la humedad óptima de un material sin tratar no presentan grandes diferencias con respecto a los que se obtienen después de añadir el cemento. En los suelos estabilizados con cemento, el efecto floculante del cemento tiende a producir un aumento de la humedad óptima y una reducción de la densidad máxima; pero, por otra parte, el mayor peso específico del cemento en relación al suelo se traduce en un aumento de la densidad.

El mayor o menor predominio de estas dos acciones contrapuestas varía con el tipo de suelo. Así, en las arenas y suelos arenosos suele producirse un aumento de la densidad, mientras que ésta, por el contrario, se reduce en los limos. En arcillas las variaciones son muy pequeñas; en lo que se refiere a la humedad óptima, suele disminuir en las arcillas e incrementarse en los limos; en las arenas y suelos arenosos los cambios son de poca importancia.

2.3.5. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica de los suelos estabilizados con cemento depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- El contenido de cemento
- La densidad alcanzada en la compactación
- La humedad de la mezcla
- La naturaleza del suelo
- La edad del material
- Las temperaturas a las que se ha visto sometido

La resistencia mecánica suele determinarse habitualmente mediante ensayos de compresión (Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo-cemento ASTM D1633).

Solamente en el caso de suelos estabilizados con cemento para explanadas se especifican resistencias a compresión, las cuales deben ser superiores a 1,5 Mpa a 7 días.

2.3.6. Desgaste

Las principales causas de erosión en las superficies del concreto son:

Movimiento de materiales desgastadores por medio del agua en movimiento.

Acción del tráfico.

Cavitación (formación, movimiento y colapso de burbujas de agua en obstrucciones o cambios de alineamiento en estructuras hidráulicas).

Para que sea resistente al desgaste debe tener una relación agua/cemento baja, un mínimo contenido de agua y un curado adecuado.

La resistencia de la mezcla a la abrasión puede determinarse por varios métodos, cada uno de los cuales intenta simular una forma de abrasión basada en la práctica. En todas las pruebas, la pérdida de masa de la muestra se emplea como medida de la abrasión.

No es fácil simular las condiciones reales de desgaste y la principal dificultad en la prueba de abrasión reside en asegurar que el resultado de una prueba represente la resistencia comparativa de la mezcla a un tipo de desgaste determinado.

CAPÍTULO III

INFLUENCIA DEL CEMENTO EN SUELOS EXPANSIVOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Se procedió a la extracción de la muestra del mismo banco en 8 puntos diferentes para asegurarnos de que todo el banco esté conformado del mismo material y es el mismo tipo de suelo, con lo cual se procedió a realizar los ensayos de:

3.1.1. Granulometría

Para el tipo de suelo se realizó el análisis granulométrico por el método del lavado dando como resultado un porcentaje del 95,34% del material que pasa por el tamiz N° 200.



Foto N°2: Tamizado de suelo

3.1.2. Límites de consistencia e índice de plasticidad del suelo

El límite líquido se realizó mediante el equipo de la máquina Casagrande a diferentes humedades obteniendo diferente número de golpes para poder realizar la gráfica de % humedad vs N.º golpes y determinar el límite líquido a los 25 golpes.

Obteniendo como resultado un L.L. = 34,6

El límite plástico se realizó amasando una parte de la muestra para conformar pequeños cilindros de aprox. 3mm de diámetro hasta denotar pequeñas aberturas o rajaduras, para luego proceder a poner las muestras en taras y proceder a su secado para poder obtener el límite plástico.

Dando como resultado un límite plástico de 23,4.

Se procedió al cálculo del índice de plasticidad con la fórmula:

$$IP = LL - LP$$

Obteniendo como resultado 11,2.



Foto N°3: Aparato Casagrande para el LL.



Foto N°4: Obtención del límite plástico

Tabla 7. Caracterización del suelo

Nº	Granulometría % Pasa Nº 200	L.L.	L.P.	I.P.
1	95,86	34,9	21,9	13,0
2	95,49	35,2	23,1	12,1
3	95,11	33,9	23,2	10,7
4	95,24	34,3	24,0	10,3
5	95,61	34,0	23,4	10,5
6	95,36	36,1	24,3	11,7
7	95,68	35,5	24,9	10,7
8	94,36	33,8	22,9	10,9
9		34,1	23,4	10,7

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Clasificación de suelo

Con todos los resultados obtenidos de la granulometría y límites de consistencia procedimos a clasificar nuestro suelo.

Por el sistema de clasificación AASHTO se obtuvo una clasificación de suelo **A-6 (8)** donde predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz Nº200; este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

Por el sistema de clasificación de suelos SUCS se obtuvo una clasificación de suelo: **CL**

Indican los suelos de arcillas inorgánicas de baja compresibilidad ($LL < 50\%$ $IP > 7\%$).

3.2. Compactación de suelo método estándar

Se siguió el procedimiento de compactación de suelos por el método estándar AASHTO T99. Para poder determinar la humedad óptima de compactación para el suelo estudiado dando como resultado una humedad óptima del CHO= 14.90% y una densidad máxima de 1.74 gr/cm³



Foto N°5: Equipo para compactación T-99



Foto N°6: Compactación de suelo molde T-99



Foto N°7: Humedecimiento del suelo

3.3. Rotura de probetas a compresión solo suelo

Para el armado de probetas se usó moldes cilíndricos desmontables de diámetro interior $D = 9.70$ cm, se procedió al armado de 8 probetas de suelo, con el porcentaje de agua óptimo para obtener una densidad máxima, para los distintos casos de rotura de las mismas siendo estas:

Tabla 8. Rotura de probetas solo suelo

N°	Identificación	Patrón	Congelamiento/Deshielo
		Lectura (Mpa.)	Lectura (Mpa.)
1	S (01)	0,55	0,77
2	S (02)	0,57	0,63
3	S (03)	0,61	0,72
4	S (04)	0,54	0,73

Nota: S = Probeta de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Rotura de probetas para aguas agresivas no se pudo realizar ya que las probetas de suelo se desarman al ser sumergidas en agua.



Foto N°8: Rotura de probeta solo suelo N°1



Foto N°9: Rotura de probeta solo suelo N°2

3.4. Pérdida por adherencia de probetas solo suelo

Para el armado de probetas se usó moldes cilíndricos desmontables de diámetro interior $D = 9.70$ cm, se procedió al armado de 8 probetas de suelo, con el porcentaje de agua óptimo para obtener una densidad máxima.

Tabla 9. Pérdida por adherencia método de raspado solo suelo

N°	Identificación	Patrón	Congelamiento/Deshielo
		Pérdida (%)	Pérdida (%)
1	S (01)	3,38	2,65
2	S (02)	3,64	3,04
3	S (03)	3,37	3,27
4	S (04)	3,55	3,02

Nota: S = Probeta de suelo.

Fuente: Elaboración propia.



Foto N°10: Desgaste de probetas solo suelo método de raspado

3.5. ENSAYOS REALIZADOS MEZCLAS SUELO-CEMENTO

3.5.1. Compactación mezclas suelo-cemento

Este método se refiere a la determinación de la relación entre la humedad y el peso unitario de mezclas de suelo-cemento cuando se compactan del modo que se prescribe en, (ASTM D558), y antes de que ocurra la hidratación del cemento.

Se obtuvieron los siguientes resultados de compactación y humedad para diferentes porcentajes de cemento utilizado (3%, 5% y 8%).

Tabla 10. Resultados de compactación mezclas de suelo-cemento

% Cemento	CHO (%)	Densidad Max. (gr/cm³)
3	15,06	1,70
5	14,78	1,68
8	15,22	1,69

Fuente: Elaboración propia.



Foto N°11: Mezcla suelo cemento al 3%



Foto N°12: Mezcla suelo cemento al 8%

3.5.2. Rotura de probetas suelo-cemento a compresión simple

Para el armado de probetas se usó moldes cilíndricos desmontables de diámetro interior $D = 9.70$ cm, se procedió al armado de 12 probetas de suelo-cemento, con el porcentaje de agua óptimo para obtener una densidad máxima, para los distintos casos de rotura de las mismas siendo estas:

Tabla 11. Resistencia media a compresión simple

N°	Identificación	Patrón	Congelamiento/Deshielo	Agua agresiva
		Lectura (Mpa.)	Lectura (Mpa.)	Lectura (Mpa.)
1	S-C 3%	1,10	1,07	0,69
2	S-C 5%	1,50	1,17	1,04
3	S-C 8%	1,73	1,34	1,10

Nota: S-C = Probeta de suelo-cemento.

Fuente: Elaboración propia.



Foto N°13: Rotura de probeta S-C al 5%



Foto N°14: Rotura de probeta S-C al 8%

3.5.3. Pérdida por adherencia de probetas suelo-cemento

Tabla 12. Pérdida por adherencia método de raspado probetas suelo-cemento

Nº	Identificación	Patrón	Congelamiento/Deshielo	Agua agresiva
		Pérdida (%)	Pérdida (%)	Pérdida (%)
1	S-C 3%	1,43	1,43	1,86
2	S-C 5%	0,96	1,13	1,63
3	S-C 8%	0,83	0,88	1,42

Nota: S-C = Probeta de suelo-cemento.

Fuente: Elaboración propia.



Foto N°15: Desgaste de probetas S-C al 8% método de raspado

3.6. Análisis de resultados

Tabla 13. Resistencia a compresión simple de probetas analizadas (Mpa.)

Tipo	Solo suelo	S-C (3%)	S-C (5%)	S-C (8%)
Patrón	0,55	1,1	1,5	1,73
C-D	0,74	1,07	1,17	1,34
A-A	-	0,69	1,04	1,10

Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva;
S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resistencia a compresión simple de probetas analizadas en porcentaje

Tipo	Solo suelo	S-C (3%)	S-C (5%)	S-C (8%)
Patrón	-	100,00	172,73	214,55
C-D	-	44,59	58,11	81,08
A-A	-	-	50,72	59,42

Nota: C-D = Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva;
S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

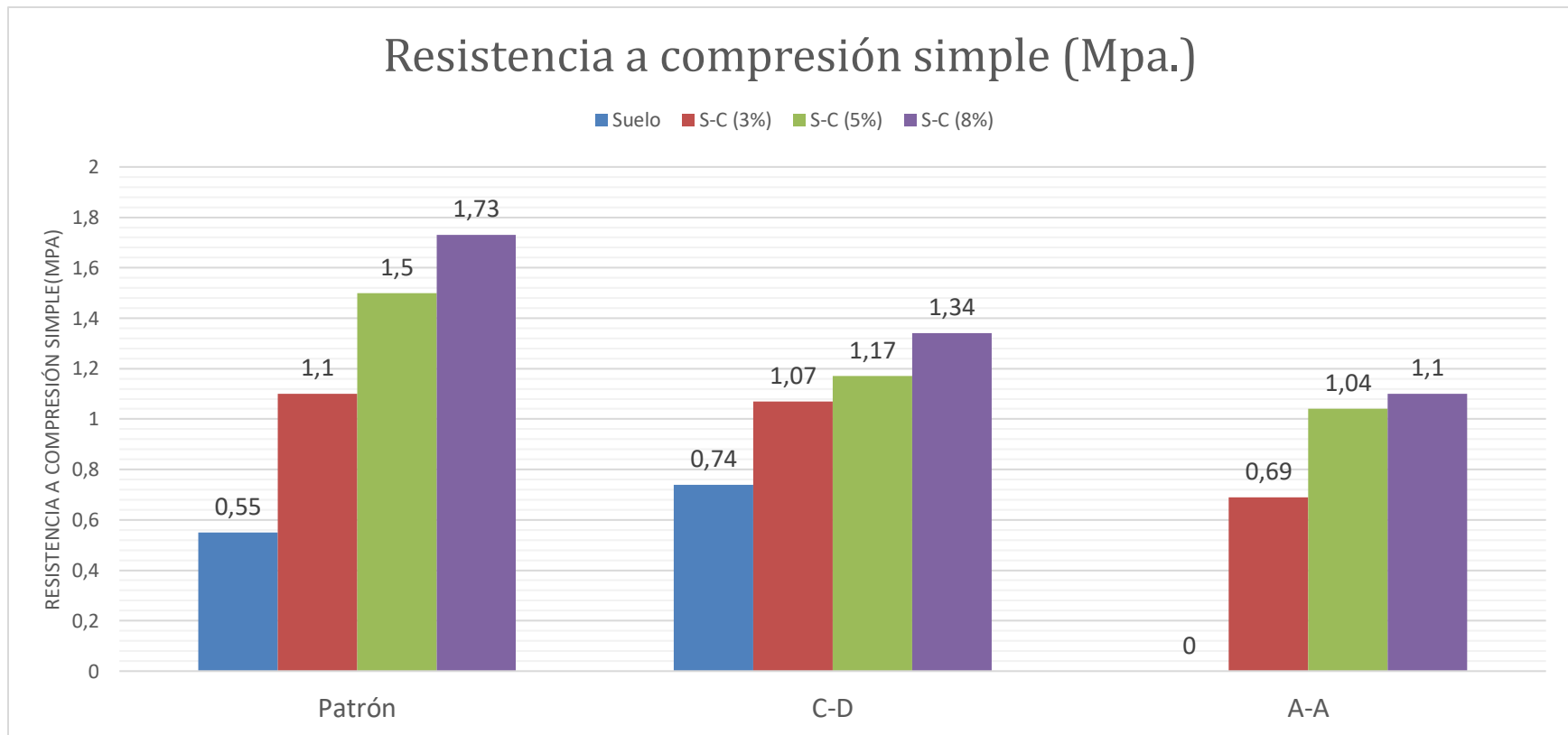
Tabla 15. Pérdida por adherencia de probetas analizadas en porcentaje

Tipo	Solo suelo	S-C (3%)	S-C (5%)	S-C (8%)
Patrón	3,49	1,43	0,96	0,83
C-D	3	1,43	1,13	0,88
A-A	-	1,86	1,63	1,42

Nota: C-D = Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva;
S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia

Figura N°4. Resistencia a compresión simple.



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis Figura N°4

El parámetro para determinar los porcentajes de incremento en cuanto a resistencia a compresión simple fueron las probetas conformadas de suelo.

Se ve un aumento en la resistencia a compresión simple debido al efecto del cemento que actúa como un material pegante, que une y solidifica las partículas de suelo incrementando así su resistencia, disminuyendo los vacíos del mismo.

Para probetas patrón:

En la figura N°4 podemos observar el aumento de la resistencia a compresión de un 100% para probetas con un contenido de cemento (3%); así mismo un aumento de la resistencia de un 172% para probetas con un contenido de cemento del (5%) y finalmente un aumento en la resistencia del 214% para probetas con un contenido de cemento del (8%).

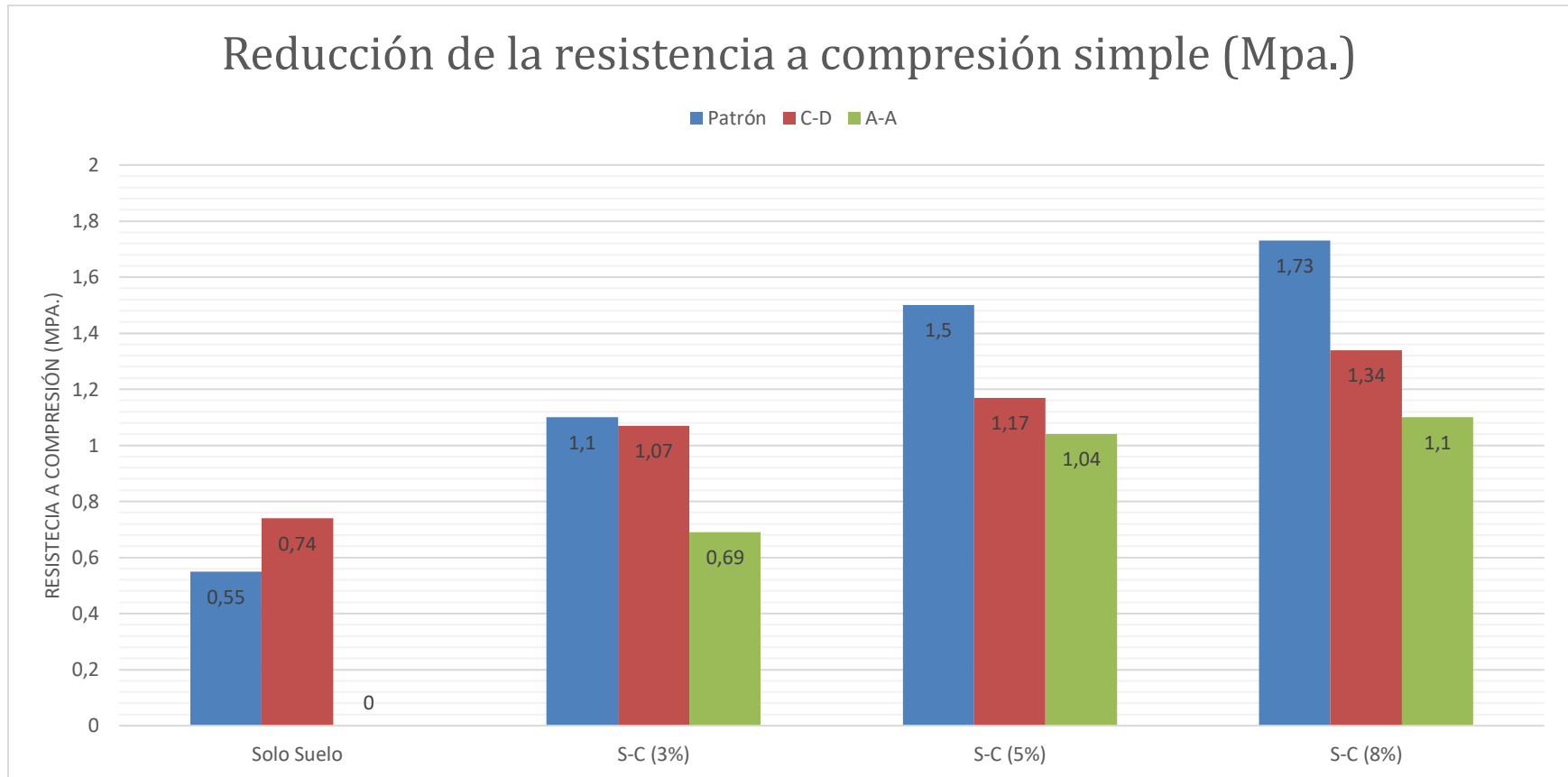
Para probetas sometidas a congelamiento deshielo:

De la figura N°4 observamos el aumento de la resistencia a compresión de un 49% para probetas con un contenido de cemento (3%); un 58% para probetas con un contenido de cemento del (5%) y finalmente un 81% para probetas con un contenido de cemento del (8%).

Para probetas sometidas en agua agresiva:

Se observa en la figura N°4 el aumento de la resistencia a compresión de un 50% para probetas con un contenido de cemento (5%) y un 59% para probetas con un contenido de cemento del (8%).

Figura N°5. Reducción de la resistencia a compresión simple



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis Figura N°5

El parámetro para determinar los porcentajes de reducción en la figura N°2 fueron las probetas patrón.

Se logra observar en la figura N°5 que el agua agresiva es el mayor problema en las probetas analizadas, bajando la resistencia a compresión simple en las probetas analizadas hasta un 37%.

Para probetas con un contenido de cemento del (3%):

En la figura N°5 se puede observar claramente la reducción de resistencia a compresión simple de un 2% para probetas suelo-cemento sometidas a congelamiento y deshielo y una reducción del 37% en su resistencia cuando fueron sometidas en agua agresiva.

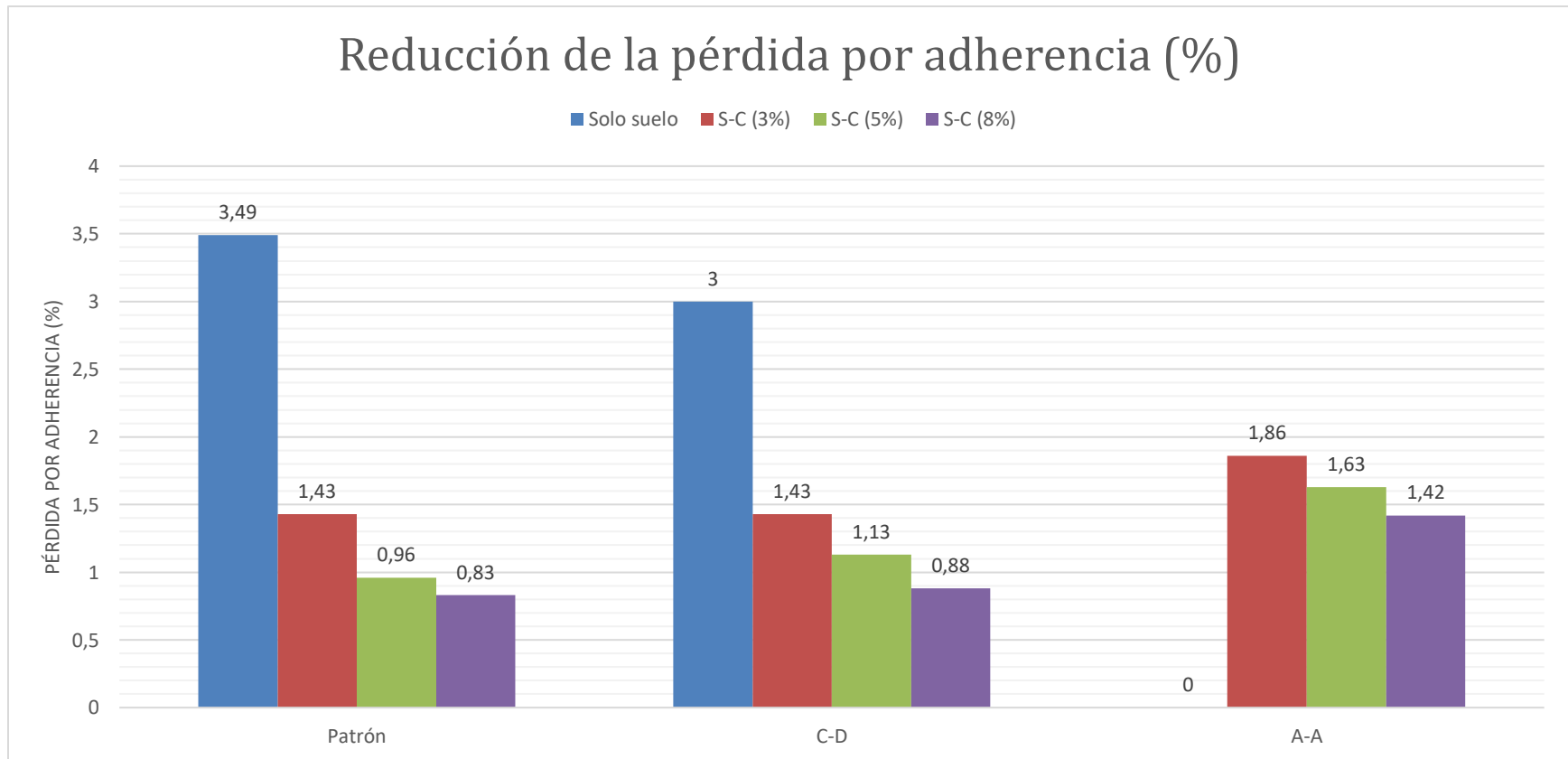
Para probetas con un contenido de cemento del (5%):

De la figura N°5 observamos claramente la reducción de resistencia en un 22% para probetas sometidas a congelamiento y deshielo y una reducción del 30% en su resistencia cuando fueron sometidas en agua agresiva.

Para probetas con un contenido de cemento del (8%):

Podemos observar en la figura N°5 una reducción en la resistencia del 22% para probetas sometidas a congelamiento deshielo y una reducción del 36% para probetas sometidas en agua agresiva.

Figura N°6. Reducción de la pérdida por adherencia



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis Figura N°6

Podemos observar en la figura N°6 que el agua agresiva sigue siendo el caso más desfavorable en cuanto a las probetas analizadas.

Para probetas patrón:

Se logra observar en la figura N°6 una mejora en adherencia de un 59 %, en probetas de suelo-cemento (3%); una mejora del 72% en probetas suelo-cemento (5%) y finalmente un aumento del 76% en probetas suelo-cemento (8%).

La mejoría de adherencia está en un rango del (59% al 76%).

Para probetas sometidas a congelamiento-deshielo:

De la figura N°6 logramos observar una mejora en la adherencia de un 52 %, en probetas de suelo-cemento (3%); una mejora del 62% en probetas suelo-cemento (5%) y finalmente una mejora del 70% en probetas suelo-cemento (8%).

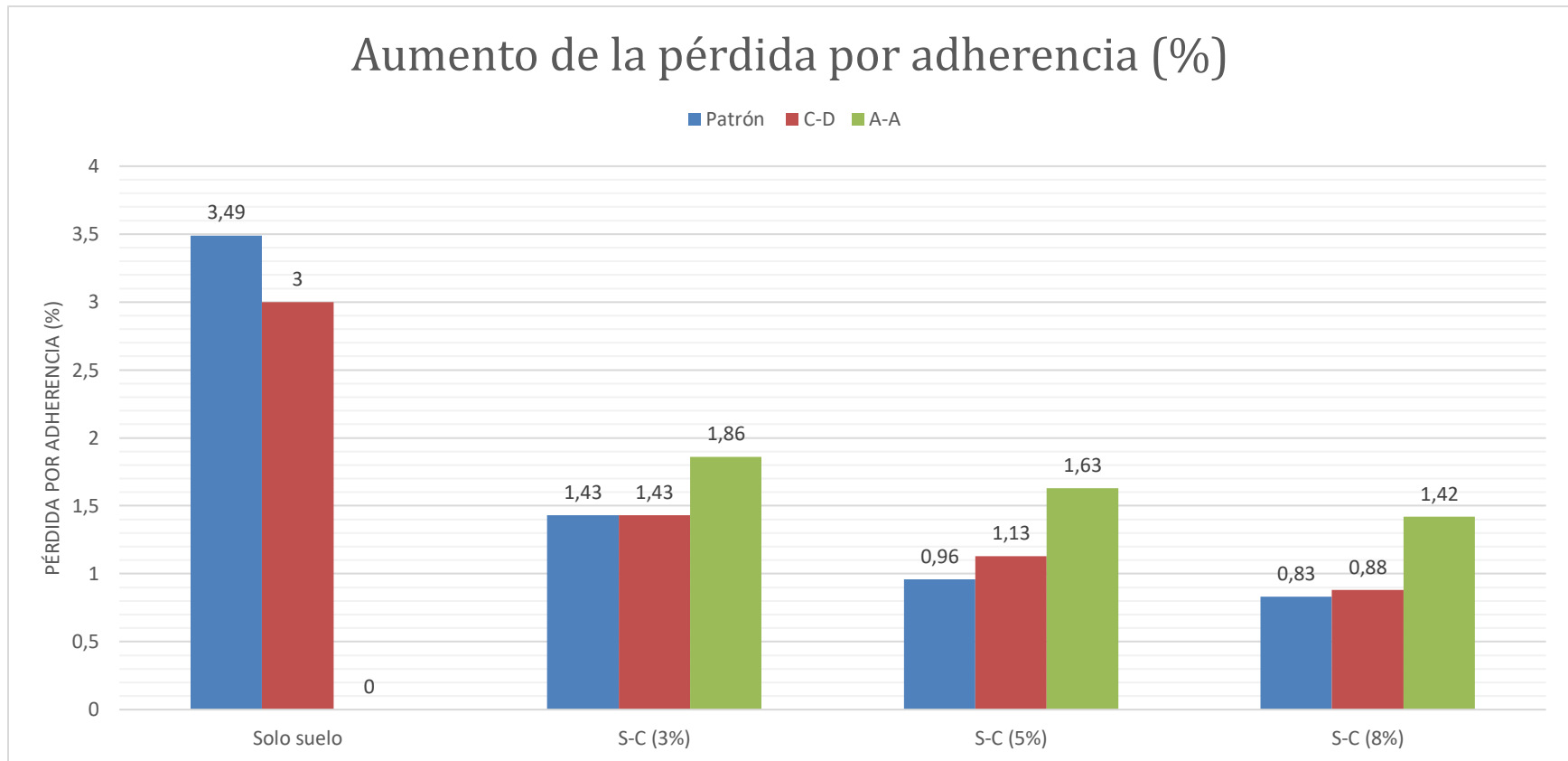
La mejoría de adherencia está en un rango del (52% al 70%)

Para probetas agua agresiva:

Se puede observar en la figura N°6 una mejora en la adherencia de un 12 %, en probetas de suelo-cemento (5%) y una mejora del 23% en probetas suelo-cemento (8%).

La mejoría de adherencia está en un rango del (12% al 23%).

Figura N°7. Aumento de la pérdida por adherencia



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis Figura N°7

De la figura N°7 tenemos un aumento de adherencia del 14% para probetas formadas de suelo al ser sometidas a congelamiento y deshielo.

Para probetas con un contenido de cemento del (3%):

Se observa en la figura N°7 que no existe variación en la adherencia con las probetas sometidas a congelamiento y deshielo y una reducción de la adherencia del 30% en probetas sometidas en agua agresiva.

Reducción del (0% al 30%).

Para probetas con un contenido de cemento del (5%):

Podemos observar en la figura N°7 una reducción en la adherencia de un 17 %, en probetas sometidas a congelamiento deshielo y una reducción del 69% en probetas sometidas en agua agresiva.

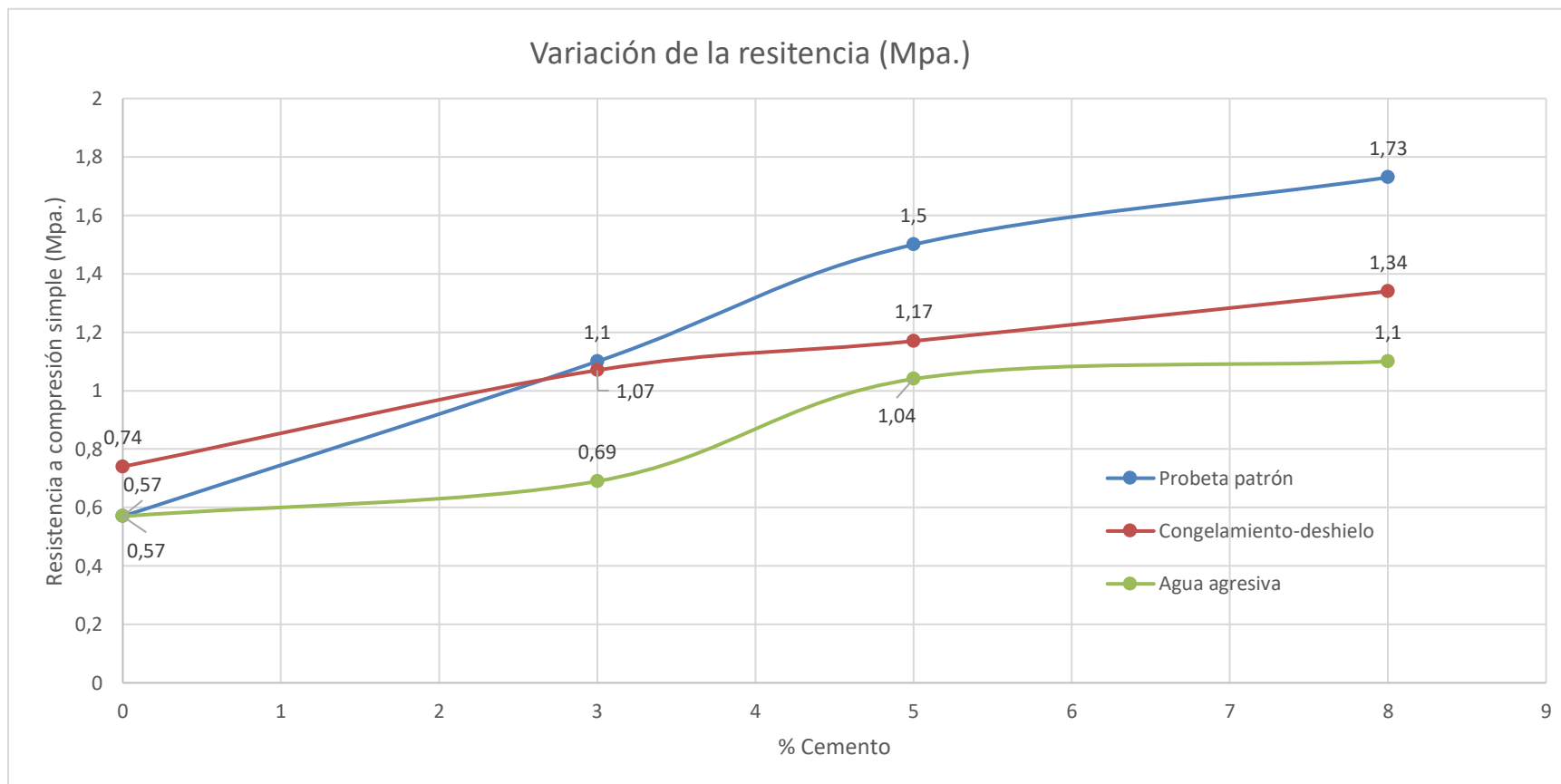
Reducción del (17% al 69%).

Para probetas con un contenido de cemento del (8%):

De la figura N°7 se observa una reducción en la adherencia de un 6% en probetas sometidas a congelamiento y deshielo y una reducción del 71% en probetas sometidas en agua agresiva.

Reducción del (6% al 71%).

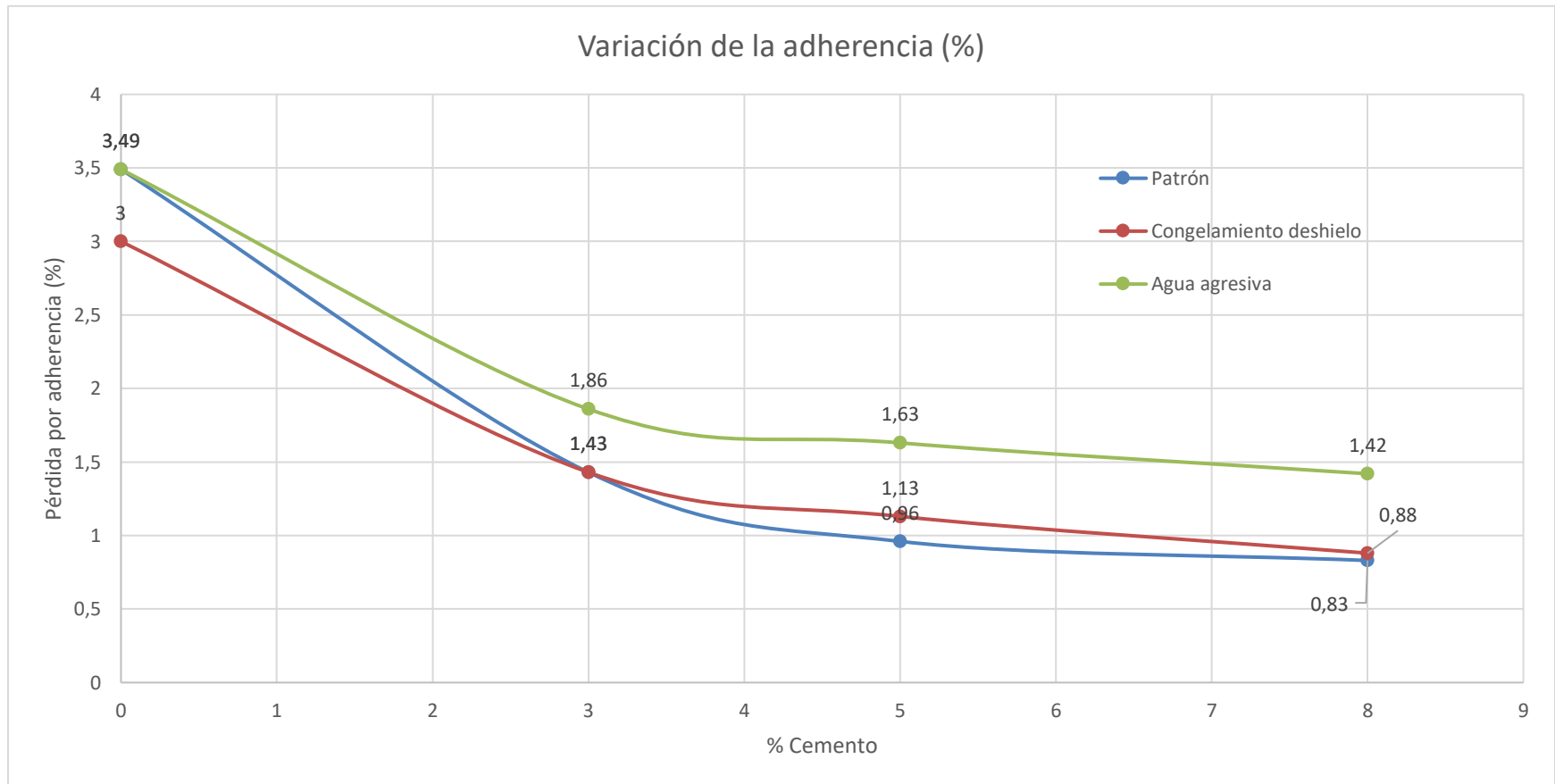
Figura N°8. Variación de la resistencia a compresión simple (Mpa.)



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N°9. Variación de la adherencia (%)



Nota: C-D= Congelamiento-deshielo; A-A = Agua agresiva; S-C = Suelo cemento.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se determinaron los cambios frente al congelamiento deshielo, aguas agresivas, adherencia y resistencia. Obteniendo como resultados aumento de la resistencia en los siguientes casos:
 - Probetas patrón un aumento del (100% al 214%).
 - Probetas para congelamiento deshielo un aumento del (44% al 81%).
 - Probetas para agua agresiva un aumento del (50% al 59%).
- En la Figura N°8 se puede observar las variaciones de las acciones físicas, químicas y mecánicas con la adición de cemento, donde podemos verificar el aumento gradual de la resistencia a compresión con la variación de cemento que va del (3%-8%).
- Podemos afirmar que los casos más desfavorables para las mezclas suelo-cemento, serán cuando estas estén sometidas en aguas agresivas (Figura N°8) donde la resistencia se ve reducida hasta un 36%, respecto a la resistencia de la prueba patrón.
- Se observa que la adherencia se ve mejorada de gran manera con la adición de cemento, donde observamos la Figura N°9, que se tenía una pérdida de 3.5% de material por adherencia; con la adición de cemento la pérdida baja a 0.83%, dando un aumento del 76% en la adherencia de la mezcla.
- Se determina que el congelamiento y deshielo no es un factor determinante en la pérdida por adherencia, si bien la pérdida por congelamiento y deshielo aumenta respecto a la prueba patrón, se ve en la Figura N°9, que sigue la misma línea de tendencia respecto a la prueba patrón y los valores son muy similares.

- Podemos afirmar que las aguas agresivas son el factor más perjudicial en las mezclas suelo-cemento, dando valores altos en la reducción de resistencia, como también en la pérdida de material por adherencia. (Figura N°8, Figura N°9).

Recomendaciones

- Se debe tener muy en cuenta, en mezclas de suelo-cemento, el factor de incidencia de las aguas agresivas o la presencia de sulfatos en los suelos; muchas veces no le damos la importancia necesaria, y con el presente estudio vemos cómo varía la resistencia y adherencia, lo cual nos puede presentar problemas al momento de realizar obras civiles.
- Podríamos aplicar ensayos de adherencia en mezclas suelo-cemento, en el programa de estudios de laboratorio, para que el estudiante tenga un mayor conocimiento de los mismos y sea consciente de sus efectos en las obras civiles.
- Se puede realizar estudios de durabilidad en los diferentes laboratorios de la carrera de Ing. Civil, para que los estudiantes estén más preparados y conozcan la incidencia de los mismos en obras civiles.
- Se recomienda que, para un próximo trabajo de investigación, hacer una comparación técnica de los datos estudiados y obtenidos en la presente investigación, con la prueba de CBR y así poder verificar los cambios respecto a la adición de cemento en diferentes porcentajes.
- Tener muy en cuenta el curado de las probetas suelo-cemento, ya que en el laboratorio no se cuenta con una cámara de curado especializada para este tipo de probetas.
- Se debe realizar un estudio especial cuando la presencia de sulfatos solubles es superior al 1% en peso en el suelo, dado que el daño que se produce es enorme y la solución normalmente muy costosa.