

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SÓDICOS A EMPLEARSE
EN EL REVESTIMIENTO DE LAS LAGUNAS DE
OXIDACIÓN DE CHICLAYO**

TESIS

Para optar el Título Profesional de
INGENIERO CIVIL

Karín Noemí Polinario Casimiro

Lima - Perú

2002

CAPITULO III APLICACIONES DEL SUELO – CEMENTO

III.1	Introducción.	17
III.2	Definiciones.	17
III.3	Aplicaciones	19
	III.3.1 General.	19
	III.3.2 Protección de Taludes.	19
	III.3.3 Revestimientos.	20
III.4	Materiales.	21
	III.4.1 Suelo.	21
	III.4.2 Cemento.	23
	III.4.3 Agua.	23
III.5	Propiedades.	23
	III.5.1 Densidad.	23
	III.5.2 Resistencia a la Compresión.	25
	III.5.3 Permeabilidad.	26
	III.5.4 Contracción.	28

CAPITULO IV DESCRIPCION Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN CAMPO Y LABORATORIO.

IV.1	Introducción.	29
IV.2	Programas de Ensayos.	29
IV.3	Ensayos de Laboratorio sobre el Suelo Natural.	30
IV.4	Análisis del Comportamiento de los Suelos.	35
	IV.4.1 Permeabilidad.	35
	IV.4.2 Expansión libre.	36

IV.5	Grado de Compactación de los Suelos.	37
IV.6	Compactación de Campo.	40
IV.7	Pruebas de Compactación en el Laboratorio.	41
	IV.7.1 Pruebas dinámicas.	43
	IV.7.2 Compactación por amasado.	47
IV.8	Análisis Químico de los Suelos.	52

CAPITULO V ESTABILIZACION DEL SUELO ARENO - ARCILLOSO MEDIANTE LA ADICION DE CEMENTO.

V.1	Descripción del Material de Campo.	54
	V.1.1 Cantera Pampa de los Perros.	54
	V.1.2 Capa Impermeable de Pimentel.	54
	V.1.3 Botadero N° 6.	54
	V.1.4 Pampa de los Perros I.	55
V.2	Análisis del Agente Estabilizante de cemento Pacasmayo.	55
V.3	Proyecto de Estabilización.	57
	V.3.1 Permeabilidad en los Materiales Empleados.	59
V.4	Ensayos de Laboratorio con Estabilización de Cemento.	61
V.5	Evaluación de la Estabilización por Cemento.	66
	V.5.1 Cantera Pampa de los Perros.	66
	V.5.2 Capa Impermeable de Pimentel.	67
	V.5.3 Pampa de los Perros II.	68
	V.5.4 Botadero N° 6.	68

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1	CONCLUSIONES	69
	VI.1.1 Características de los Suelos.	69
	VI.1.2 Cantera de Pampa de los Perros.	69
	VI.1.3 Capa Impermeable de Pimentel.	70
	VI.1.4 Pampa de los Perros I.	70
	VI.1.5 Pampa de los Perros II.	70
	VI.1.6 Botadero N° 6.	71
VI.2	RECOMENDACIONES	71
	VI.2.1 Recomendaciones Generales.	71
	VI.2.2 Lagunas de San José.	72
	VI.2.3 Lagunas de Pimentel.	72
	REFERENCIAS.	74
	ANEXOS.	75

PREFACIO

El presente tema de investigación tiene como intención mostrar la problemática de los suelos sódicos, su mezcla con el agente estabilizador y su importancia en relación con los proyectos de Lagunas de Oxidación. Asimismo, mostrar los aspectos que deben tomarse en cuenta en los diseños de suelo-cemento a emplearse como núcleo y cobertura impermeable en Lagunas de Oxidación.

La Tesis presentada es el resultado de un estudio geotécnico de los suelos salinos a ser utilizados en las Lagunas de Oxidación de San José y Pimentel, cuya realización se incluye en el Proyecto de Alcantarillado de la ciudad de Chiclayo, desde el respectivo muestreo en campo hasta su procesamiento de tallado y minuciosos trabajos de laboratorio, donde se realizaron las pruebas y ensayos para mejorar el tipo de suelo encontrado en la zona, a través de diversas estabilizaciones ensayadas; llegándose a especificar la dosificación de un suelo-cemento adecuada y la más óptima.

Dejo la inquietud de seguir investigando sobre otras probables mezclas o estabilizaciones para estos suelos sódicos debido a que en el mercado existe una variedad de aditivos que podrían dar resultados al aplicarlos a estos tipos de suelos.

INTRODUCCION

En la presente tesis se presentan los resultados de las investigaciones realizadas con los suelos de la ciudad de Chiclayo, que se utilizarán como núcleo y cobertura impermeable en las Lagunas de San José y Pimentel. Se contempla el empleo de los suelos de la cantera impermeable de Pampa de los Perros, producto de las excavaciones realizadas para construir las lagunas de oxidación existentes en dicha zona. Al haberse determinado que dichos suelos son salinos sódicos y de comportamiento dispersivo, se propuso su lavado en pozas con el empleo de agua y yeso debido a la ausencia de suelo de buena calidad en los alrededores de la zona para obtener la estanqueidad de los diques sin tratamiento especial.

Se decidió investigar más detalladamente la posibilidad de una estabilización de dicho suelo por un procedimiento clásico y simple que ofreciera mayor seguridad en cuanto a su comportamiento con el tiempo; se parte de la premisa que un suelo sódico necesita además del lavado, la mejora química. También se evaluaron alternativas para evitar el ataque del agua a la estructura del suelo mediante su estabilización.

El material impermeable propuesto es de naturaleza areno – arcillosa, por lo que el empleo de cemento como elemento estabilizador es una buena alternativa. Con el objeto de disminuir el costo del estabilizador se trató de determinar el óptimo contenido de cemento, en base a su resistencia cortante y al control de dispersión y expansión de las muestras del suelo. Con este propósito se investigaron las canteras impermeables propuestas que contienen elementos salino – sódicos, como todos los suelos impermeables de los alrededores de Chiclayo.

CAPITULO I

GENERALIDADES

I.1 OBJETIVO

El objetivo de la presente tesis es buscar un adecuado tratamiento de los suelos salinos – sódicos, de clasificación areno arcillosa del norte peruano, estabilizándolos con cemento y mezcla de suelo, para conformar el revestido de las Lagunas de Oxidación ubicadas en San José Chiclayo.

I.2 ANTECEDENTES

Es por todos conocido que en la costa norte del país existen suelos salinos. En todos los proyectos importantes de irrigación se utilizan drenes para desalinizar los suelos recuperados para la agricultura y de este modo aumentar la producción de cultivos. Sin embargo, estos procedimientos necesitan mucho tiempo para obtener resultados satisfactorios en la reducción de las sales.

La salinización de los suelos ocurre principalmente en climas áridos, que dificultan el desarrollo de los cultivos; por otro lado, si el contenido de sodio en el suelo es elevado con relación a los otros cationes existentes en el suelo, las partículas arcillosas pueden dispersarse, perdiendo el suelo así su estructura, lo que lo hace poco adecuado para obras civiles.

El U. S. Salinity Laboratory (1953) clasifica a los suelos en base a su conductividad eléctrica (CE) y a su porcentaje de sodio intercambiable (PSI). El PSI es un índice de los efectos del sodio sobre las propiedades del suelo. La CE es un índice de salinidad sobre los cultivos.

La salinidad de los suelos se determina de la siguiente forma:

<u>Clase de salinidad</u>	<u>CE (mmhos/cm)</u>
Ligera	2 – 4
Media	4 – 8
Fuerte	8 –16
Extrema	> 16

La sodicidad de los suelos se evalúa en función del PSI:

<u>Clase de sodicidad</u>	<u>PSI</u>
Ligera	7 – 15
Media	15 – 20
Fuerte	20 – 30
Extrema	> 30

En la agricultura se recuperan los suelos salinos mediante el lavado o el drenaje. Este procedimiento es adecuado para los suelos salinos no – sódicos. En los suelos sódicos, el sodio se encuentra retenido por el complejo de cambio mediante enlaces químicos, por lo que el paso del agua no es suficiente para romper estos enlaces y eliminar así el sodio. En estos casos se utilizan además mejoras químicas, como la adición de yeso previo al lavado.

En la visita de inspección realizada a las lagunas de oxidación existentes y los drenes de irrigación en áreas vecinas a las lagunas de San José y Pimentel, se pudo notar el comportamiento de suelos sódicos, por lo que se hicieron los ensayos químicos pertinentes y ensayos de dispersión tipo pin-hole y exposición directa al agua de especímenes compactados. Los resultados confirmaron la sospecha sobre la existencia de suelos salino sódicos en los materiales de las canteras y su efecto nocivo a la estructura del suelo.

I.3 PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES

Los suelos provienen de las excavaciones realizadas para construir las lagunas de oxidación de la ciudad de Chiclayo, Provincia de Lambayeque,0 situada en la Ciudad de Dios a una altitud topográfica comprendida entre los 9 m.s.n.m. La posición geográfica de esta zona está definida por las coordenadas 06° 45' 58" de Latitud Sur y 79° 57' 48" de Longitud Oeste.

I.4 FUNDAMENTO ORIGINAL DE LA ESTABILIZACION DEL SUELO

Es frecuente encontrar en las canteras del norte peruano, los suelos adecuados que se requiere para un determinado fin, sobre todo en lugares específicos. Este hecho obviamente abre tres posibilidades de decisión:

Aceptar el material tal como se le encuentra, pero tomando en cuenta realmente su calidad en el diseño a efectuar.

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. Esta última alternativa es la que da lugar a investigar sobre la estabilización del suelo. En rigor, son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos con vista a hacerlos apropiados para un uso específico, lo que constituye la estabilización en sí.

Las propiedades de un suelo se pueden alterar de muchas formas, como por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o de agentes estabilizantes. Debe tenerse siempre muy presente que debido a la gran variabilidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos.

I.5 ESTABILIZACION SUELO – CEMENTO

Aunque la utilización del cemento mezclado con los suelos naturales es uno de los tantos métodos de estabilización, se ha considerado conveniente estudiar la estabilización por suelo, cemento, las mezclas de suelo cemento y los otros usos

que se da a estas mezclas. La idea del suelo – cemento no es nueva. Parece ser que se utilizó por primera vez en 1917, en Inglaterra, y a pesar del éxito obtenido no tuvo un desarrollo rápido.

En los Estados Unidos comenzó su uso en gran escala en 1935 y, desde entonces se ha usado muchísimo, tal vez por los amplios y concienzudos estudios sobre el tema llevados a cabo por la Portland Cement Association. Alemania, al igual que los Estados Unidos, utilizó muchísimo el suelo – cemento en la última guerra mundial, principalmente para la construcción de aeropuertos.

El suelo – cemento es un material con características propias, compuesto de suelo, cemento y agua; todo ello debidamente compactado. Se dice que tiene características propias porque sus características no corresponden ni a las de un suelo ni a las de un concreto hormigón. Son en efecto, características propias, aunque gocen de las características de los suelos y de los concretos en cierta extensión. En este conglomerado el suelo representa el árido, en manera alguna inerte, y como entra en el conjunto en proporción del 90% o aún más, no es extraño que transmitan al conjunto alguna de sus cualidades.

El agua es indispensable en el conjunto para producir la hidratación del cemento, teniendo además las funciones de prestar docilidad al conjunto y de conseguir el grado de compactación adecuado. El suelo – cemento debe tener por razón de existencia, dos condiciones fundamentales: resistencia y durabilidad.

Como es sabido, Proctor llegó a la conclusión de que existía una relación entre el contenido de humedad de un suelo, su grado de compactación y su densidad después de compactar, dicho de otra forma, que para una energía dada de compactación hay un cierto contenido de humedad que produce la densidad mayor y como consecuencia, la mayor resistencia.

Posteriormente se ha demostrado que esta ley fijada para los suelos, es válida también para el suelo – cemento. Esto nos induce a operar de forma que el suelo – cemento se compacte hasta la densidad máxima con un contenido óptimo de humedad, con lo cual se obtendrá una mezcla que nos dé la mayor resistencia.

La utilización del suelo – cemento comenzó con la estabilización de superficies de carreteras, pero se ha adaptado después a otras estructuras. Actualmente se le emplea en pavimentos de caminos y calles para tráfico liviano, pistas para aeropuertos secundarios, accesos, veredas y patios, revestimientos de canales, lagunas de oxidación, silos elevados, silos subterráneos y por último hasta en la construcción de viviendas rurales.

El Cemento Portland estabiliza el suelo en su máxima resistencia debido a sus particulares cualidades favorables. Al mezclar el cemento con el suelo éste modifica la mayoría de las propiedades perjudiciales de los elementos componentes del suelo y le da a éste una estructura de difícil alteración. Además, el fraguado del cemento fija porciones del suelo estabilizado en su máxima densidad impidiendo que este

estado pueda ser modificado por la pérdida o aumento de humedad y refuerza la solidez de toda la masa que llega a adquirir una resistencia al corte conveniente.

Las investigaciones de laboratorio y la experiencia en el terreno han demostrado que los suelos pueden endurecerse agregando cemento Portland, como para producir un material estructural adecuado para lo que se requiera. Los suelos son complicados químicamente y también lo es el cemento y cuando se les compacta con cantidad adecuada de humedad, reaccionan juntos de varios modos. La manera en que reaccionan se observa en forma definitiva por medio de las pruebas científicas de laboratorio y es necesario que el éxito de la construcción en el terreno queda garantizado por estos experimentos hechos en mezcla de cemento con cada uno de los tipos individuales de suelos que se encuentran en cada proyecto. Las pruebas de experimentación para este trabajo han estado en uso por muchos años con éxito y han sido aprobadas por la ASTM. Estas pruebas de suelo – cemento hace posible eliminar los sistemas de tanteo en la construcción:

- a) La cantidad apropiada de agua que se debe agregar a la mezcla suelo – cemento para obtener la máxima efectividad del cemento.
- b) La densidad apropiada a la cual debe compactarse la mezcla húmeda de suelo – cemento para obtener la máxima efectividad.
- c) La apropiada cantidad de cemento que se requiere para endurecer el suelo adecuada y económicamente.

Las pruebas se han diseñado como para permitir la investigación en mezclas de suelo– cemento, de modo que los tres fundamentos indicados se puedan determinar en laboratorio, antes de gastar dinero en la construcción. La prueba de humedad – densidad se usa para controlar la humedad y densidad que se debe emplear en el terreno, las otras pruebas de laboratorio determinan la cantidad de cemento que requieren las mezclas de suelo – cemento compactadas para resistir las fuerzas originadas por congelamiento y deshielo repetidamente y por ciclos severos de humedecido y secado.

Estas pruebas son las siguientes:

1. - Prueba para las relaciones de humedad densidad de las mezclas de suelo – cemento (ASTM: designación D558-44).
2. - Prueba de humedecido y secado en mezclas de suelo – cemento compactadas (ASTM: designación D559-44).
3. - Prueba de congelamiento y deshielo (ASTM: designación D560-44).

El procedimiento de laboratorio consiste en pulverizar el suelo desechando la grava y la roca y tomando el material que pasa por el tamiz N° 4. Las relaciones de humedad - densidad se toman entonces para esta fracción que pase por el tamiz N° 4 y para muestras de suelo – cemento se moldean con el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad y se someten a las pruebas indicadas anteriormente, para determinar la cantidad de cemento que se requiere para producir un material estructural que cumpla con ciertos requisitos experimentales.

CAPITULO II

ORIGEN Y NATURALEZA DE LOS SUELOS SALINOS Y SODICOS

II.1 INTRODUCCION

Tanto en la costa norte, central y sur del Perú existen suelos con contenido de sales y sulfatos elevados, que requieren el uso de cementos resistentes a los mismos y que tienen características de colapsabilidad.

II.2 FUENTES DE SALES SOLUBLES

Las sales solubles del suelo consisten principalmente en varias proporciones de los cationes sodio, calcio y magnesio, y de los aniones cloruro y sulfato; el catión potasio y los aniones bicarbonato, carbonato y nitrato, se encuentran generalmente en cantidades menores. La fuente original y en cierto modo la más directa de la cual provienen las sales antes mencionadas, son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en las rocas expuestas de la corteza terrestre. Se estimó que el contenido medio de cloro y azufre de la corteza terrestre es de 0.05 y 0.06 %, respectivamente, mientras que el sodio, calcio y magnesio casi se encuentra a razón del 2 a 3%. Durante el proceso de intemperización química que comprende hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación, estos constituyentes gradualmente son liberados, adquiriendo mayor solubilidad.

II.3 SALINIZACION DE LOS SUELOS

Los suelos salinos se encuentran principalmente en zonas de clima árido o semiárido. En condiciones húmedas, las sales solubles originalmente presentes en los materiales del suelo y las formadas por la intemperización de minerales, generalmente son llevadas a las capas inferiores, hacia el agua subterránea y finalmente transportadas a los océanos. Por lo tanto, los suelos salinos no existen en las regiones húmedas, excepto cuando el suelo ha estado expuesto al agua de mar en los deltas de los ríos y otras tierras bajas cercanas al mar. En las regiones áridas el lavado es de naturaleza local y las sales solubles no pueden ser transportadas muy lejos, debido a la poca precipitación y elevada evaporación característica de clima árido, que tiende a concentrar las sales en los suelos y en el agua superficial.

El drenaje restringido es un factor que frecuentemente contribuye a la salinización de los suelos y que puede llevar consigo la presencia de una capa freática poco profunda o una baja permeabilidad del suelo. La capa freática poco profunda casi siempre guarda estrecha relación con la topografía del terreno. Debido a la baja precipitación en las regiones áridas, las corrientes del drenaje superficial están poco desarrolladas y, en consecuencia, existen depresiones sin drenaje por no tener salida a corrientes permanentes. El drenado de las aguas con sales de las tierras arriba de la depresión, puede elevar el nivel de la capa freática hasta la superficie en las tierras bajas, causar un flujo temporal o formar lagos salados permanentes. Bajo tales condiciones, el movimiento ascendente del agua subterránea o la evaporación del agua superficial da origen a la formación de suelos salinos.

II.4 ACUMULACION DE SODIO INTERCAMBIABLE EN LOS SUELOS

La reacción según la cual un catión en solución reemplaza a un catión adsorbido, se llama intercambio de cationes. Los cationes de sodio, calcio y magnesio son rápidamente intercambiables. El intercambio de cationes es un fenómeno de superficie y como tal, se identifica principalmente con el limo fino, la arcilla y otras fracciones de materia orgánica de los suelos.

La capacidad de un suelo para adsorber e intercambiar cationes, se puede medir y expresar en equivalentes químicos y se denomina capacidad de intercambio de cationes. Generalmente se expresan en miliequivalentes por 100 gramos de suelo. El calcio y el magnesio son los principales cationes que se encuentran en la solución del suelo y en el complejo catiónico de los suelos normales de las regiones áridas. Cuando en estos suelos se acumula un exceso de sales solubles, generalmente es el catión sodio el que predomina en la solución del suelo y en esta forma, el sodio puede ser el catión predominante al cual está sujeto el suelo, debido a la precipitación de los compuestos de calcio y magnesio.

A medida que la solución del suelo se concentra más a consecuencia de la evaporación del agua y su adsorción por las plantas, los límites de solubilidad del sulfato y carbonato de magnesio casi siempre se exceden, por lo cual se precipitan, causando el correspondiente aumento en las proporciones relativas del sodio. Bajo tales condiciones, una parte del calcio y del magnesio intercambiables son reemplazados por el sodio.

II.5 CARACTERISTICAS DE SUELOS SALINOS Y SODICOS

En un concepto se considera al suelo como cuerpo tridimensional con forma, superficie y profundidad. El concepto de suelo, como el de un perfil que posee profundidad pero no necesariamente forma o área, es también un término de uso muy generalizado. Los suelos salinos y sódicos pueden definirse y diagnosticarse con base en las determinaciones hechas en muestras de suelo, de tal manera que la información así obtenida contribuye de manera importante en varios campos.

II.5.1 SUELOS SALINOS

El término salino se aplica a suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4mmhos/cm. a 25° C, con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15. Generalmente el pH es menor de 8.5. Estos suelos corresponden al tipo descrito por Hilgard (1906) como suelos "álcali blanco" y a los "solonchaks" de los autores rusos. En estos suelos el establecimiento de un drenaje adecuado, permite eliminar por lavado las sales solubles, volviendo nuevamente a ser suelos normales.

Casi siempre se reconocen los suelos salinos por la presencia de costras blancas de sal en su superficie. Las características químicas de los suelos salinos quedan determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes. La cantidad de sales solubles presentes controla la presión osmótica de la solución del suelo.

II.5.2 SUELOS SODICOS – SALINOS

Llámase así a aquellos suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4mmhos/cm. a 25°C y el porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15. Este tipo de suelos se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a la de los suelos salinos.

Cuando hay exceso de sales, el pH raramente es mayor de 8.5 y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades del suelo pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos - no salinos. A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio, que a su vez, puede cambiar a carbonato de sodio. En cualquier caso, el lavado de un suelo puede hacerlo mucho más alcalino (pH mayor de 8.5), el manejo de los suelos sódicos – salinos sigue siendo un problema hasta que se elimina el exceso de sales y de sodio intercambiable.

II.5.3 SUELOS SODICOS – NO SALINOS

Son aquellos suelos cuyo porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15 y la conductividad del extracto de saturación es menor de 4mmhos/cm. a 25°C. El pH generalmente varía entre 8.5 y 10. Estos suelos corresponden a los llamados "álcali negro" por Hilgard y, en ciertos casos, a los "solonetz" de los autores rusos. Con mucha frecuencia se encuentran en las zonas áridas y semiáridas en áreas pequeñas e irregulares conocidas como "manchas de álcali impermeables". Siempre que en los

suelos o agua de riego no se encuentre yeso, el drenaje y lavado de los suelos sódicos – salinos conduce a la formación de suelos sódicos no salinos. Como ya se mencionó, la eliminación del exceso de sales en este tipo de suelos tiende a aumentar el grado de hidrólisis del sodio intercambiable, lo cual frecuentemente eleva el valor del pH. En los suelos altamente sódicos, la materia orgánica dispersa y disuelta puede depositarse en la superficie debido a la evaporación, causando así un ennegrecimiento y dando origen al término “álcali negro”.

II.6 DEFORMACION DE ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS SOBRE SUELOS SALINOS

Deformación de estructuras hidráulicas debido a la lixiviación de sales han sido reportados en numerosas ocasiones. En años recientes, debido al incremento en volumen de trabajo en zonas áridas y semiáridas, un número de casos han sido reportado de deformaciones en construcción públicas e industriales hechas sobre suelos salinos. Estas deformaciones fueron observadas con más frecuencia en estructuras construidas con suelos detriticos y arcillosos conteniendo yeso.

El primero en hacer caso al problema de construcción de estructuras públicas e industriales en regiones de suelos con yeso fue I.I Cherkasov, quién investigó en 1950 las deformaciones de estructuras en Kazakhstan construidas sin ninguna precaución en especial con suelos arcillosos conteniendo más de 40% de yeso. Estos estudios establecieron que las deformaciones de las estructuras ocurridas durante una corta duración así como un prolongado remojo de la base con agua como resultado

de la sumersión y corrosión de la cimentación. Medidas apropiadas fueron adoptados para prevención de más amplias deformaciones.

Basados en observaciones en la región árida de Katakstan, I.I.Cherkasov concluyó que reduciendo la capacidad de carga e incrementando la deformabilidad de bases hechas de suelos con alto contenido de yeso con macroporos que fue posible debido a su corta duración (1 a 2 años y menos) saturación producida por la corrida de agua por la irrigación de aguas verdes de plantaciones y otras aguas locales, fuente de humedad. En suelos de este tipo, las deformaciones son observadas juntas con la sal contenida en el suelo, éstas son disueltas y transportadas por el camino por filtración de flujo. En opinión de II. Cherkasov, la reducción en la resistencia del suelo yeso con macroporos ocurre principalmente debido al remojo de la sal y contacto entre los granos en el estado de saturación.

Debido a la reducción de la resistencia del suelo de la base, la inestabilidad de la cimentación de la construcción fue un inminente peligro. La principal causa de deformación en los edificios fue por colapso y deformaciones de tuberías de los suelos altamente arcillosos debido a un prolongado remojo por el agua de la lluvia y aguas de irrigación y también debido a la pérdida de corriente en la línea de agua.

CAPITULO III

APLICACIONES DEL SUELO – CEMENTO

III.1 INTRODUCCION

Este capítulo contiene información sobre aplicaciones, materiales y propiedades para el suelo- cemento. La intención es proporcionar información básica sobre la tecnología del suelo- cemento con énfasis en la aplicación práctica sobre proporcionamiento de mezcla, propiedades y pruebas en su construcción.

III.2 DEFINICIONES

Suelo – cemento: A.C.I 116R define al suelo cemento como “una mezcla de suelo y una cantidad adecuada de cemento Portland y agua compactados a altas densidades”, también como un material producido por combinación, compactación y curado de la mezcla de suelo, agregado, cemento Portland, posiblemente aditivos incluyendo puzolana y agua para formar un material endurecido con propiedades ingenieriles específicas. El suelo agregado son partículas garantizadas por la pasta de cemento, pero distinto al concreto porque la partícula individual no es cubierta con pasta de cemento.

Contenido de cemento: Contenido de cemento está normalmente expresado en porcentaje sobre un peso o volumen básicamente. El contenido de cemento por peso está basado en el peso del suelo al horno, según la fórmula:

$$C_v = \left(\frac{\text{peso de cemento}}{\text{peso de suelo secado al horno}} \times 100 \right)$$

el contenido de cemento requerido por peso puede ser convertido a un contenido de cemento, que tiene un volumen aproximado de 1 pie³, usando la siguiente fórmula:

$$C_v = \frac{D - \left[\frac{D}{1 + C_w / 100} \right]}{94} \times 100$$

donde:

C_v= Contenido de cemento, porcentaje por volumen de masa de suelo-cemento compactado.

D= Densidad seca de suelo cemento en lb/pie³

C_w= Contenido de cemento, porcentaje por peso de suelo al horno.

El criterio usado para determinar un adecuado factor de cemento para suelo-cemento, donde se descubrió como un porcentaje de cemento por volumen en términos de una bolsa de cemento de 94 lb-US. El contenido de cemento por volumen en términos de otros pesos de bolsas, tal como para unos 80 lb de bolsa canadiense, puede ser determinados, por sustitución de 80 por 94 en el denominador en la fórmula anterior.

III. 3 APLICACIONES

III.3.1 GENERAL

El principal uso del suelo-cemento es de un material de base para reforzar bitúmenes y pavimento de concreto. Otros usos incluyen la protección de taludes para presas y terraplenes, revestimientos de canales, reservorios, lagunas de oxidación y masas de suelo-cemento ubicadas en los diques y estabilización de cimientos.

III.3.2 PROTECCIÓN DE TALUDES

Después de la Segunda Guerra Mundial, hubo una rápida expansión de proyectos de recursos de agua, losas de defensa de rocas de satisfactoria calidad para la protección de taludes de presas aguas arriba, no fue semejante localmente para muchos de estos proyectos. Altos costos para transportar losas de defensa desde la cantera a distancias grandes amenazaron la economía de algunos proyectos.

El U.S. Bureau of Reclamation (USBR) comenzó un mayor esfuerzo de investigación para estudiar la conformidad del suelo-cemento como una alternativa para losas de defensa convencionales. Basados sobre estudios de laboratorio que indicaron que el suelo-cemento puede ser hecho con suelo arenoso, produciéndose una apariencia durable y resistente a la erosión, el USBR construyó una completa serie de pruebas, con secciones a escala en 1951, después de 10 años de observación de la sección de prueba, el USBR fue convencido de esto, especificando el suelo-cemento en 1961 como una alternativa para losas de defensa para la protección de taludes.

Desde 1961, más de 300 proyectos grandes de suelo- cemento para la protección de taludes fueron construidos en los EE.UU y Canadá. En suma, para presas aguas arriba, revestimiento de presas, el suelo- cemento provee protección a los taludes para canales, vertederos, bordes de la costa, carreteras y terraplén para vía férrea, y terraplén para reservorios tierra adentro.

Para taludes expuestos de moderada a severa acción de oleadas, o desechos conducidos por las corrientes rápidas de agua, el suelo cemento es usualmente colocado en capas horizontales sucesivas de 6 a 9 pies de ancho por 6 a 9 pulg de espesor adyacente al talud.

Para aplicaciones menos severas, de manera semejante asociado con pequeños reservorios, presas y lagunas, la protección de taludes puede consistir de capas de suelo- cemento de 6 a 9 pulg de espesor colocados paralelamente a las caras del talud.

III.3.3 REVESTIMIENTOS

El suelo- cemento fue aprovechado como un material de revestido de baja permeabilidad por más de 30 años. Durante la mitad de 1950, un número de 1 a 2 acres de área de Reservorio en el Sur de California fue revestido con 4 a 6 pulg de espesor de suelo- cemento. Uno de los más grandes proyectos de revestido de suelo- cemento fue laqueado con cauilla, una regulación del Reservorio Terminal de la Coachella, condado del Valle del distrito del sur de California, el sistema de irrigación, terminado en 1969, los 135 acres de base de Reservorio tienen unas 6 pulg de espesor de revestido de suelo- cemento, y la arena del terraplén conformando el Reservorio de cubierta del talud con 2 pies de suelo- cemento normal.

En suma, para reservorios de almacenamiento de agua el suelo- cemento fue usado como revestido en lagunas de tratamiento de agua de desagüe, desecante de fango de alcantarillas, estanque de sedimento de ceniza, terraplén de sólidos de las aguas de desagüe. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU avaló pruebas de laboratorio para evaluar la compatibilidad de materiales de revestido exponiéndolo a varios tipos de agua de desagüe. Las pruebas indicaron que después de 1 año de exposición al lixiviado para sólidos de agua de desagüe municipales, el suelo- cemento considerablemente endurecido y de núcleo similar al concreto de cemento Portland. En suma esto adquiere menor permeabilidad durante la exposición a períodos. El suelo- cemento fue expuesto a varias aguas peligrosas de desagüe, incluyendo formulaciones de pesticidas tóxicos y aguas de desagües gomosas y plásticas. Como resultado de todas estas exposiciones a agua peligrosas, no ha ocurrido filtración después de 2 ½ años de exposición. Después de 625 días de exposición a esta agua de desagüe, la resistencia a la compresión de suelo- cemento excedió a la resistencia a la compresión de un suelo- cemento similar al que no fue expuesto a estas aguas.

III.4 MATERIALES

III.4.1 SUELO

Casi todos los tipos de suelos pueden ser usados para suelo- cemento. Algunas excepciones incluyen los suelos orgánicos y las arcillas altamente plásticas. Pruebas incluidas en ASTM D4318 son útiles para identificar estos problemas de materiales. Los suelos granulares son preferidos, éstos son pulverizados y mezclados con más facilidad que los suelos de grano fino, resultando más económicos en suelo-

cemento porque ellos requieren menos cantidad de cemento. Típicamente los suelos que contienen entre 5 y 35% de finos que pasan la malla N° 200 producen el más económico suelo- cemento. En todo caso los suelos que tienen grandes contenidos de finos (material que pasa la malla N°200) y baja plasticidad puede ser económica su estabilización.

La gradación del agregado requerido no es restrictiva como en el concreto convencional . Normalmente el tamaño máximo nominal está limitado a 2 pulg, con un mínimo de 55% que pasa la malla N°4. Para superficie de suelo- cemento no expuesto a fuerzas de moderada erosión, semejante a las aplicaciones de protección de taludes, estudios de Nussbaum muestran la forma del perfeccionamiento del suelo que contiene menos de 20% agregado grueso (material granular retenido en la malla N° 4).

Suelos de grano fino generalmente requieren más contenido de cemento para satisfacer el endurecimiento y, en el caso de arcillas, es usualmente más dificultoso de pulverizar para su propia mezcla. En suma, arcillas (nudillos de arcilla e intermezclado con suelo granular) no se rompe durante la mezcla normal. El U.S Bureau of Reclamation requiere que el suelo sea de un tamaño máximo de 1pulg. La presencia de finos no es siempre perjudicial, en todo caso algunos finos no plásticos pueden ser beneficiosos. En arenas o gravas uniformemente graduadas, finos no plásticos, incluyendo cenizas volantes, cemento y agregado encubiertos sirve para rellenar el vacío en la estructura del suelo y ayuda a reducir el contenido de cemento.

III.4.2 CEMENTO

Para muchas aplicaciones normalmente son usados el tipo I y el tipo II de cemento Portland conforme al ASTM C150. El cemento requerido varía dependiendo de las propiedades deseadas y el tipo de suelo. El rango de contenido de cemento varía de un valor bajo de 4% a uno alto de 16% por peso seco de suelo. Generalmente la porción arcillosa del suelo incrementa la cantidad requerida de cemento.

III.4.3 AGUA

El agua está necesariamente dentro del suelo- cemento para ayudar a obtener una máxima compactación y para el hidratado del cemento Portland. El contenido de humedad del suelo- cemento está usualmente en el rango de 10% a 13% por peso de suelo- cemento secado al horno.

El agua potable y otras aguas relativamente limpias, libres de cantidades dañinas como álcali, ácidos o materias orgánicas pueden ser usadas. El agua de mar puede usarse satisfactoriamente. La presencia de cloruros en el agua de mar puede incrementar tempranamente la resistencia.

II.5 PROPIEDADES

III.5.1 DENSIDAD

La densidad del suelo- cemento está usualmente medida en términos de densidad seca, aunque la densidad húmeda puede ser usada para un control de densidad en el campo. El ensayo de densidad húmeda (ASTM D558) es usado para determinar su

propio contenido de humedad y densidad (referido a su óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca) para que la mezcla de suelo- cemento esté compactada. Una típica curva densidad- humedad está mostrada en la Fig.5.1.

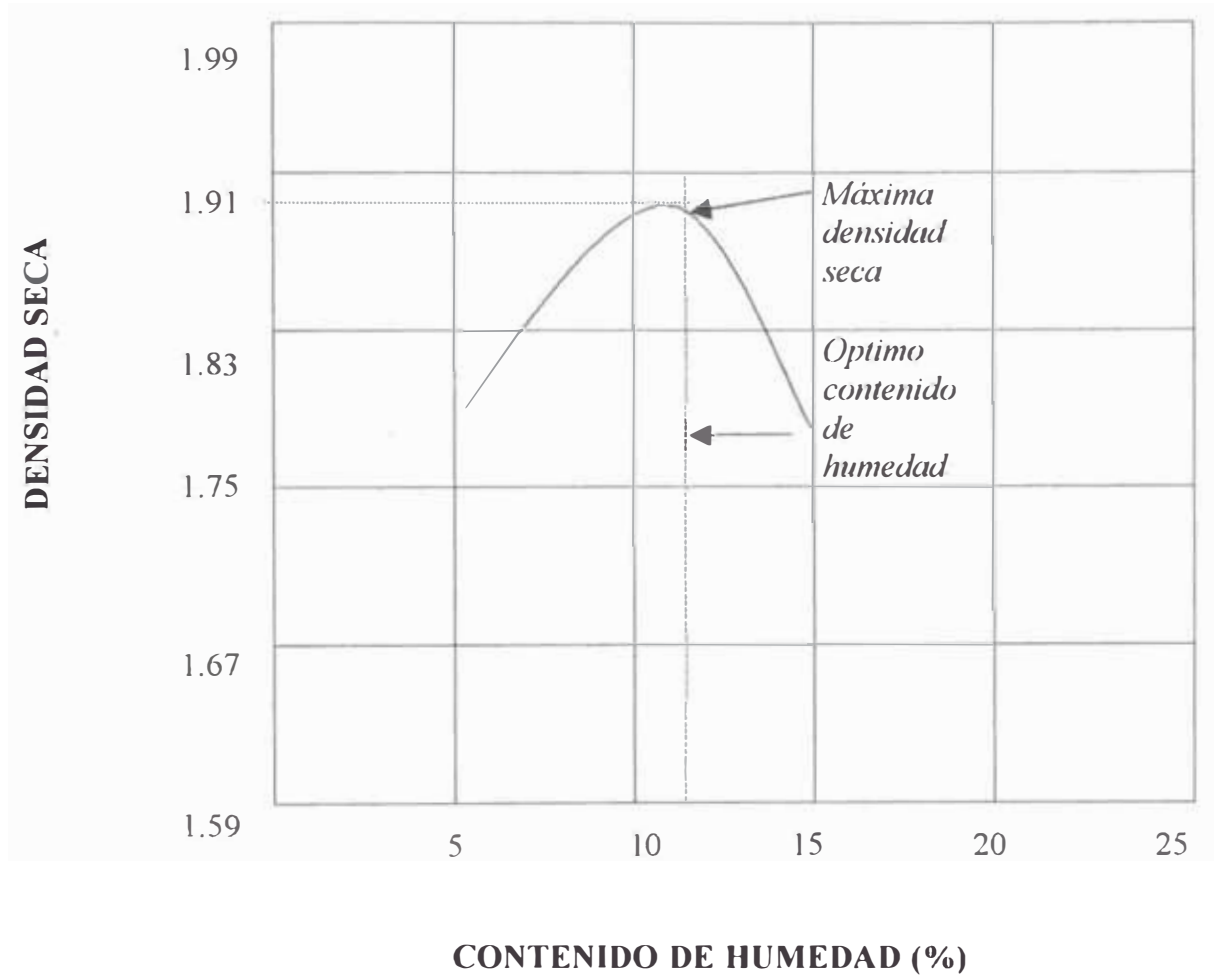


Fig.5.1 –CURVA TIPICA DE HUMEDAD – DENSIDAD

III.5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESION.

La resistencia a la compresión no confinada f_c' es el más excesivamente referenciado a propiedades de suelo- cemento y usualmente bien proporcionado conforme a ASTM D1633. Esto indica el grado de reacción de la mezcla suelo- cemento y agua y su razón de endurecimiento.

La resistencia a la compresión sirve como un criterio para determinar el mínimo contenido de cemento requerido para proporcionarlo al suelo- cemento. Porque la resistencia está directamente relacionada con la densidad, esta propiedad afecta de la misma manera, densidad por grado de compactación y contenido de agua.

Típicamente rangos de 7 y 28 días de resistencia a la compresión no confinada para especímenes de suelo- cemento sumergidos, se muestran en la Tabla 5.2.

.

Desde antes pruebas de testigos remojados son recomendadas más para estructuras de suelo- cemento, que pueden hacerse permanentemente o intermitentemente saturados durante su vida de servicio y exhibidos bajo condiciones saturadas bajan la resistencia.

Estos datos son agrupados bajo tolerantes grupos de suelo por textura incluyendo el rango del tipo de suelo normalmente usado en la construcción de suelo- cemento. El rango de valores obtenido son representativos para una mayoría de suelos normalmente usados en la construcción de suelo- cemento en Estados Unidos.

Tabla 5.2—Rangos de Resistencia a la Compresión no Confinada de Suelo-cemento.

Tipo de suelos	Resistencia a la compresión- sumergidos (kg/cm ²)	
	7 días	28 días
Suelos arenosos y grava AASHTO grupos A-1, A-2, A-3 SUCS: GW, GC, GP GM, SW, SC, SP, SM.	21- 42	28- 70
Suelos limosos: AASHTO grupos A-4 y A-5 SUCS: ML y CL	17- 35	21- 63
Suelos arcillosos: AASHTO grupos A-6 y A-7 SUCS: MH y CH	14- 28	17- 42

III.5.3 PERMEABILIDAD

La permeabilidad de muchos suelos es reducida por la adición de cemento. En la Tabla 5.3 se resume los resultados de pruebas de permeabilidad en laboratorio conducidas sobre una variedad de suelos. Pruebas a gran escala de filtración fueron ejecutadas por el U.S Bureau of Reclamation en una sección de capas tipo pasos de escalera revestidos de suelo- cemento sobre el reservorio de regularización en Lubbock, Texas. Los resultados indicaron un decrecimiento de la permeabilidad con el tiempo, posiblemente debido a la reducción de las rajaduras en el suelo- cemento, rellenándose estas rajaduras con sedimento y la tendencia de estas rajaduras a componerse.

Tabla 5.3 – Permeabilidad de Suelos Tratados con Cemento.

Clasificación de Suelos ASTM	Densidad Seca gr/cm³	Contenido de Humedad (%)	Contenido de Cemento (%) por peso	K coeficiente de Permeabilidad *10⁻⁶ cm/seg.
Arena standard Ottawa	1.73	10.8	0	48,880
	1.80	9.4	5.3	6,900
	1.87	9.7	10.5	76
Arena graduada Ottawa	1.64	13.7	0	16,300
	1.67	13.6	5.4	470
	1.71	12.3	10.5	21
Arena (SP)	1.61	12.2	0	750
	1.61	13.2	3.2	560
	1.65	12.3	6.5	190
	1.68	12.0	9.5	21
Arena limosa (SM)	1.6	14.9	0	5,000
	1.59	14.7	3.2	1,400
	1.65	15.1	6.4	60
Arena (SP)	1.59	16.0	0	360
	1.69	14.8	6	20
	1.74	13.5	12.2	1
Arena (SP)	1.61	13.8	0	140
	1.7	13.3	3.1	33
	1.72	13.4	6.3	0.3
	1.73	13.4	9.6	0.02
Arena (SP)	1.79	11.0	0	36
	1.85	10.4	5.5	5
Arena (SP)	1.78	12.0	0	23
	1.84	11.7	5.5	8
Arena limosa (SM)	1.94	9.6	0	16
	2.0	8.0	8.6	0.1
Arena limosa (SM)	1.88	10.8	0	10
	1.96	8.10	8.9	2
Arena limosa (SM)	1.79	11.5	0	5
	1.83	12.3	5.5	3
Arena limosa (SM)	1.89	11.0	0	5
	1.90	10.5	9.1	0.1
Arena limosa (SM)	1.99	—	0	16
		10.1	3.3	0.4
			7.3	0.07

III.5.4 CONTRACCIONES

Suelos tratados con cemento al ser secados sufren contracciones. La contracción y subsecuente rajadura dependen del contenido de cemento, tipo de suelo, contenido de agua, grado de compactación y condiciones de curado. Suelo- cemento hecho para cada uno de los tipos de suelo, produce diferentes modelos de rajadura. Suelo- cemento hecho con arcilla desarrollan grandes contracciones, pero las rajaduras son pequeñas y rajaduras individuales con espaciamiento cercano (rajaduras en línea delgada espaciadas de 2 a 10 pies).

Suelo- cemento hecho con suelo granular producen menos contracciones, pero largas rajaduras espaciadas sobre grandes intervalos (usualmente de 10 a 20 pies) Métodos sugeridos para reducir o minimizar contracciones, rajaduras incluyendo cuidados de la superficie del suelo- cemento húmeda más allá del período normal de curado y colocado del suelo- cemento con un contenido ligeramente abajo del óptimo contenido de humedad.

CAPITULO IV

DESCRIPCION Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN CAMPO Y LABORATORIO

IV.1 INTRODUCCION

La principal base de criterio para identificar suelos finos en el campo, es la investigación de las características de dilatancia, tenacidad y resistencia en estado seco. El color y el olor del suelo pueden ayudar especialmente en suelos orgánicos.

IV.2 PROGRAMACION DE ENSAYOS

Se programaron ensayos de clasificación de suelos para determinar la composición granulométrica y plasticidad de las muestras, así como para determinar la uniformidad del suelo de la cantera de Pampa de los Perros, capa impermeable de Pimentel y Botadero N°6. También se programaron ensayos químicos para determinar la salinidad y sodicidad de los suelos previstos para las capas impermeables y el núcleo. Se programaron ensayos de compactación de suelos y de colapso con la inundación, así como de dispersión tipo “pin-hole”.

Al notar en el laboratorio dispersiones de las muestras compactadas al sumergirlas en agua, se programó una serie de ensayos para estabilizar el suelo con cemento, en porcentajes variables en peso, curados al aire y en agua y a diferentes edades de ensayo. Se ensayaron muestras a la compresión no – confinada y a la expansión. Los porcentajes utilizados comenzaron en cero y terminaron en 7% en peso, que son los valores usuales en la estabilización con cemento.

IV .3 ENSAYOS DE LABORATORIO EN SUELO NATURAL

Se obtuvieron muestras del material impermeable de la cantera de Pampa de los Perros, capa impermeable de Pimentel, Pampa de Perros I, Botadero N° 6, Pampa de Perros II, así como el previsto para realizar el núcleo de las Lagunas de San José.

De la cantera de Pampa de los Perros, localizada en Ciudad de Dios y producto de las excavaciones de las Lagunas existentes, se ensayaron 10 muestras para clasificar el suelo. Casi todas las muestras ensayadas de esta cantera resultaron ser arenas arcillosas, con porcentajes de finos (pasa la malla N° 200) variables entre 33 a 45%. El porcentaje de grava (retenido en la malla N° 4) fue de 1 a 15%. Dos muestras resultaron ser grava arcillosa (GC) y grava limosa (GP – GM) con porcentajes de finos menores y con mayor porcentaje de grava que las arenas arcillosas.

El material de la capa impermeable de Pimentel obtenido en la superficie (0.80 m) de las calicatas excavadas, resultó ser arena arcillosa (SC) y el núcleo permeable de San José, existente en el subsuelo del sitio de las lagunas del mismo nombre, grava limosa (GM) con 17% de finos (pasa la malla N° 200) y 48% de grava.

Del material de Pampa de los Perros I, ubicada en Ciudad de Dios y resultado de las excavaciones de las lagunas existentes, se obtuvieron muestras que resultaron ser arena arcillosa (SC), con porcentaje de finos de 43.65% (pasa la malla N°200) y 1.93% de grava.

Del material de Botadero N°6, resultado de las excavaciones de las lagunas existentes, se obtuvieron 4 muestras, de las cuales se trabajó con la mezcla de 3 de ellas: N°1 + N°2 + N°4, la N°1 resultó ser una arena arcillosa (SC) con un porcentaje de finos del 18.22% (pasa la malla N°200) y 32% de grava, la N°2 resultó ser una grava arcillosa (GC) con un porcentaje de finos de 15% (pasa la malla N°200) y 55% de grava, la N°3 resultó ser una arcilla inorgánica de elevada plasticidad (CH) con un porcentaje de finos de 61% (pasa la malla N°200) y 16,5% de grava, la N°4 resultó ser una grava arcillosa (GC) con un porcentaje de finos de 13,7% (pasa la malla N°200) y 57% de grava.

También se ejecutaron 6 ensayos de compactación tipo Proctor Modificado. Un ensayo se realizó con las siguientes muestras: cantera de Pampa de los Perros, capa impermeable de Pimentel, material denominado Pampa de los Perros I, Botadero N°6, material denominado Pampa de los Perros II, de este material se seleccionó dos muestras denominadas: (muestra 1 + muestra 6) y muestra 5.

En el primer caso, Pampa de los Perros, el óptimo contenido de humedad fue de 9.9% y la máxima densidad seca de 2.04 gr/cm^3 . En el segundo caso, capa impermeable de Pimentel, el óptimo contenido de humedad fue de 11.64% y la máxima densidad seca fue de 1.91 gr/cm^3 .

En el tercer caso, Pampa de los Perros I, el óptimo contenido de humedad fue de 9% y la máxima densidad seca fue de 2.01 gr/cm^3 , en el cuarto caso, Botadero N° 6, el óptimo

contenido de humedad fue de 15.15% y la máxima densidad seca fue de 1.78 gr/cm^3 , en el quinto caso Pampa de los Perros II (muestra 1+ muestra6) el óptimo contenido de humedad fue de 8.9% y la máxima densidad seca fue de 2.06 gr/cm^3 , en el sexto caso Pampa de los Perros (muestra 5), el óptimo contenido de humedad fue de 11.3% y la máxima densidad seca fue de 1.97 gr/cm^3

Todos los ensayos anteriores se ejecutaron en el Laboratorio Geotécnico del Cismid de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los resultados de los ensayos se presentan en los anexos N°1 y N°2.

Para determinar la salinidad de las muestras de suelo, se ejecutaron ensayos de sales completos. Para determinar la clase de salinidad, se midió la conductividad eléctrica (CE) y para determinar la sodicidad, se determinó el PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable) según el procedimiento recomendado por el US Salinity Laboratory (1953). Los ensayos químicos se ejecutaron en los Laboratorios LASA Ingenieros. También se determinó el pH y el porcentaje de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y nitratos, así como el RAS (Relación de Adsorción del Sodio).

Los principales resultados son los siguientes:

ORIGEN	CE (mmhos/cm)	pH	RAS	PSI
Pampa de los Perros	21	7.6	24.99%	11.6%
Capa Impermeable de Pimentel	60	7.1	98.58%	16.2%
Núcleo San José	52	7.2	46.22%	17.8%
Pampa de los Perros I	30	7.2	41.50%	38.0%
Botadero N° 6:				
Muestra 1	6.4	7.8	9.40%	12.0%
Muestra 2	8.4	7.8	17.00%	19.0%
Muestra 4	3.0	7.8	4.50%	6.0%
Pampa de los Perros II:				
Muestra 1	61.0	7.4	50.60%	38.0%
Muestra 6	9.0	7.8	14.00%	16.0%
Muestra 5	41.0	7.4	24.90%	26.0%

Se concluye que los suelos son, sin excepción, extremadamente salinos, ya que su CE es mayor que 16 en la mayoría de los casos. Por otro lado, de acuerdo a su PSI, el suelo de Pampa de los Perros es ligeramente sódico, al igual que Botadero N°6, mientras que los suelos de la capa Impermeable de Pimentel y Núcleo San José son medianamente sódicos,

ya que sus valores son superiores a 7 y 15 respectivamente; los suelos de Pampa de los Perros I y II son extremadamente sódicos por ser sus valores superiores a 30.

Se ejecutaron 2 ensayos de pin –hole test, de acuerdo a la norma ASTM D4647, en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Los resultados indicaron que la cantera de Pampa de los Perros tenía una muy ligera a ninguna erosión coloidal y que la muestra de la capa impermeable de Pimentel tenía una ligera a moderada erosión, muy lenta. La dispersión es mayor en Pimentel que en Pampa de los Perros, lo que es consistente con los valores del PSI. Debe indicarse que el ensayo pin-hole fue establecido para determinar la dispersividad de arcillas en presas de tierra y evaluar la tubificación o “piping”. En el caso de mezclas arenosas con arcilla como el nuestro, los resultados de dispersión son obviamente menores.

Con el objetivo de evaluar el posible colapso de las muestras con la saturación, se realizaron ensayo de colapso en el laboratorio. Este ensayo consiste en someter a las muestras compactadas al ensayo de consolidación unidimensional en seco, hasta una carga de 2 kg/cm^2 , y luego inundarla para determinar su asentamiento con la saturación.

Los resultados de colapso fueron pequeños, sin embargo se apreció la expansión de las muestras de la cantera de Pampa de los Perros, es decir su aumento de volumen con la inundación.

IV.4 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

IV.4.1 PERMEABILIDAD

Un material se dice que es permeable cuando permite el paso de los fluidos a través de sus poros. Tratándose de suelos, se dice que éstos son permeables cuando tienen la propiedad de permitir el paso del agua a través de sus vacíos. No todos los suelos tienen la misma permeabilidad; de ahí que se les haya dividido en suelos permeables y suelos impermeables. Se les llama impermeables a aquellos suelos (generalmente arcillosos) en los cuales la cantidad de escurrimiento de agua es pequeña y lenta.

Dado que un suelo presenta una maraña de vacíos, de tamaño, forma y distribución compleja y variada, la medida del escurrimiento del agua a través de su masa es mucho más complicada que en un tubo u orificio de forma y dimensiones conocidas. En algunos casos, para facilitar el drenaje, es conveniente tener un suelo permeable, especialmente en la construcción de bases y sub-bases de pavimentos. En los suelos permeables los asentamientos no son peligrosos, pues su consolidación es rápida, a causa del escape fácil del agua a través de sus poros.

En otros casos, se requiere que el suelo sea impermeable, como es el caso del revestido de una laguna de oxidación, para evitar filtraciones en la base del mismo.

El grado de permeabilidad de un suelo es medido por su “Coeficiente de Permeabilidad”. Su determinación se basa en la ley propuesta por Darcy, en el siglo XIX, y establece lo

siguiente: la velocidad del escurrimiento de un suelo, es proporcional a una cierta constante K, propia y característica de cada suelo, y a la gradiente hidráulica i, que es la relación entre la diferencia de niveles H y la distancia L que el agua tiene que recorrer.

$$V = K \times C = K \times \frac{H}{L} \dots \dots \dots (4.1)$$

Como la gradiente hidráulica es un número abstracto, el coeficiente K tendrá las dimensiones de la velocidad, y estará dado en cm/seg. , ó cm/min., en el sistema métrico.

IV.4.2 EXPANSION LIBRE

Para determinar el grado de expansión de los suelos de la zona se tomará en cuenta algunos criterios basados en las propiedades índices del suelo. Si el Límite de Contracción es menor de 10% ó 12% tendrá fuertes cambios de volumen con la variación del contenido de humedad.

A causa del gran incremento de su superficie específica que está ligado en general al tamaño decreciente de las partículas de un suelo, es de esperar que la intensidad del fenómeno de adsorción esté muy influenciada por la cantidad de arcilla que contenga el suelo. Skempton en 1953 en su Tratado sobre la Actividad Coloidal de las arcillas, citado por Rico y Del Castillo 1976, define una cantidad denominada Actividad de una arcilla como la relación entre el IP y el porcentaje en peso del suelo más fino que 0.002mm.

La actividad puede valer 0.38 en arcillas caoliníticas, 0.90 en arcillas ilíticas y alcanzar valores superiores a 7 en arcillas montmorilloníticas, lo cual da idea de las características de plasticidad de las arcillas, según su composición mineralógica.

En el presente trabajo se efectuaron ensayos de Expansión Libre, midiendo la expansión unidimensional que se produce al saturar una muestra de suelo compactada a su óptimo contenido de humedad del ensayo Proctor Modificado. La muestra de suelo remoldeada se colocó entre 2 piedras porosas, luego se saturó y se midió su hinchamiento o expansión en una sola dirección mediante un deformímetro colocado en la parte superior del equipo.

IV.5 GRADO DE COMPACTACION DE LOS SUELOS

El objetivo principal de la compactación del suelo es obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas pueden variar de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo-deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre. Es menos frecuente, aunque a veces no menos importante, que también se compacte para obtener unas características idóneas de permeabilidad y flexibilidad. Finalmente, suele favorecer mucho la permanencia de la estructura térrea ante la acción de los agentes erosivos como consecuencia de un proceso de compactación.

Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales tales como cortinas para presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordes de defensa, muelles, pavimentos, etc. En ocasiones se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de las cimentaciones sobre arenas sueltas. Así, la compactación de suelos es, ante todo, un problema constructivo de campo.

La compactación se introdujo entonces como un medio para reducir la deformación, mejorar la estabilidad y disminuir la permeabilidad y susceptibilidad de los suelos a la erosión por el agua. La eficiencia de cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan los procesos de compactación de campo en el laboratorio en forma representativa (hasta donde ello sea posible).

De esta manera, pasan a formar el plano de interés o ensayos de compactación de laboratorio y los estudios que en éstos, han de hacerse en torno a tales procesos. Como quiera que los procesos de campo involucran costos altos, en general los estudios para proyecto habrán de hacerse con base en el trabajo de laboratorio; esta afirmación no invalida el hecho de que en la técnica actual se haga un uso cada vez más extenso de terraplenes de prueba, en que se investigan modelos a escala natural para obtener normas de proyecto. Los estudios de compactación en laboratorio también desempeñan un papel muy importante en el control de la calidad de los trabajos.

Así pues, los procesos de compactación han de estudiarse con referencia a las técnicas de campo y a todo un conjunto de técnicas de laboratorio; pero además de los dos puntos de vista anteriores, existe un tercero, relativamente descuidado hasta épocas recientes y es el que se refiere a la investigación de las propiedades que es posible obtener en los otros dos, completará el cuadro en la forma en que el Ingeniero requiera para establecer un criterio adecuado.

En campo nos interesa fijar un peso volumétrico seco en base a una prueba de laboratorio. Como existe una diferencia esencial entre estos dos, también se podrían presentar problemas con el proceso de compactación de campo; al final sucede que el peso volumétrico que se obtiene en la obra no es idéntico al peso volumétrico seco máximo de la prueba de laboratorio que sirve de base al estudio.

La diferencia entre ambos valores se mide a través del concepto de Grado de Compactación. Luego se define como Grado de Compactación de un suelo compactado en la obra a la relación, en porcentaje, entre el peso volumétrico seco obtenido por el equipo en campo y el máximo correspondiente a la prueba de laboratorio en que se fundamentó el estudio.

$$G_c (\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_d \text{ máx}} \times 100$$

El grado de compactación de un suelo es:

γ_d : peso volumétrico seco del material compactado en la obra.

γ_{dmax} : Es el máximo peso volumétrico seco obtenido en la prueba de laboratorio que se utilice

En este trabajo se ha tratado de estimar el rango de valores de las máximas densidades secas de laboratorio del suelo estabilizado y sin estabilizar para conformar la capa impermeable de las lagunas de oxidación.

IV.6 COMPACTACION DE CAMPO

Cualquiera que sea el tipo de compactación empleado, los resultados en un suelo dado dependen de cierto número de factores; los más importantes son el contenido de agua y la energía de compactación (determinada principalmente por la presión y el área de contacto rodillo – suelo, el espesor de la capa compactada y el número de pasadas del equipo).

La acción del rodillo pata de cabra, cualquiera que sea el diseño de sus patas, hace progresar la compactación de una capa de suelo de abajo hacia arriba. En las primeras pasadas sus protuberancias y una parte del tambor mismo penetran en el suelo, permitiendo que la mayor presión se ejerza sobre el suelo del lecho inferior de la capa por compactar, para que esto ocurra, el espesor de la capa a compactar no debe ser muy superior a la longitud de las patas. Al aumentar el número de pasadas del equipo, la porción inferior de la capa adquiere progresivamente mayor resistencia e impide la

penetración de las patas del rodillo, que comienzan a compactar el suelo superyacente. Por fin, cuando la mayor parte de la capa que está siendo compactada adquiere resistencia, todo el peso del equipo puede ser transmitido al suelo a través de las patas; el tambor queda entonces separado de la superficie del terreno y se dice que el rodillo camina sobre el terraplén. Algunas veces se especifica, como un medio sencillo de control, que la compactación de una capa no debe suspenderse antes de que esa condición ocurra. Sin embargo puede suceder que, si el suelo tiene un contenido de agua relativamente alto o si la presión unitaria bajo las patas del rodillo es muy elevado, el tambor permanezca en continuo contacto con el suelo aunque el número de pasadas se incremente arbitrariamente (Hilf 1959, citado por Rico y Del Castillo, 1976). En cualquier caso, se tiene cierta penetración de las patas durante las últimas pasadas del rodillo y esta acción por sí sola produce una superficie escarificada en condiciones adecuadas para recibir la siguiente capa, sin dejar un plano de debilidad en el contacto. Es interesante señalar el efecto de las características del rodillo y el número de pasadas en los resultados de la compactación de diversos suelos con rodillo pata de cabra.

IV.7 PRUEBAS DE COMPACTACION EN EL LABORATORIO

La función de las pruebas de compactación de laboratorio es permitir la especificación racional y el control de los trabajos de campo, mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de sus relaciones con ciertas propiedades índices de fácil determinación. Esta función se cumple sólo en la medida en que los procedimientos de compactación en el laboratorio permiten reproducir, o asemejar, las condiciones de campo; principalmente el mecanismo y la energía de compactación.

Como las propiedades mecánicas de los suelos dependen de las condiciones de su compactación, y las deseables en determinada estructura no necesariamente lo son en la otra, el uso de un solo patrón de compactación en el laboratorio resulta irracional para todas las posibles situaciones de campo.

Los procesos de compactación de campo son, en general, demasiado lentos y costosos como para reproducirlos a voluntad, cada vez que se desee estudiar cualquiera de sus detalles. No proporcionan un modo práctico de disponer de una herramienta de análisis, estudio de investigación, tal como lo requiere el problema de la compactación de suelos, con sus muchas complicaciones y complejidades. Así, la tendencia a desarrollar pruebas de laboratorio que reproduzcan fácil y económicamente aquellos procesos debe de ser obvia para cualquiera que se interese en racionalizar las técnicas de campo y en conocer más un proceso tan difícil e importante. Las mismas razones inducen a las pruebas de laboratorio a ser base de estudios para proyecto y fuente de información para planear un adecuado plan de trabajo de campo.

En rigor, actualmente se hacen dos usos principales de las pruebas de compactación de laboratorio. En el primero, se compactan los suelos para obtener datos para proyecto de estructuras de tierra; esta información se refiere a resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, etc. En este caso, la representatividad de la prueba, en el sentido que se produzca en el laboratorio un suelo con las mismas propiedades mecánicas que después se obtendrán al compactar los materiales en el campo, es obviamente esencial.

Pero hay un segundo uso de las pruebas de compactación, que es el que de ellos se hace en las operaciones de control de calidad; en este caso la prueba funciona fundamentalmente como un índice comparativo del peso volumétrico de laboratorio y de campo y la similitud de propiedades mecánicas entre ambos es mucho menos importante, siéndolo por consecuencia cualquier idea de “representatividad” referente a la prueba. Lo esencial de un índice de comparación es que sea siempre el mismo

A partir de 1933, en que Proctor desarrolló su prueba, la primera históricamente, han ido apareciendo otras muchas; las pruebas efectuadas se definen en la presente tesis como:

IV.7.1 PRUEBAS DINAMICAS

Todas las pruebas dinámicas hoy en uso participan de las siguientes características comunes:

- 1) El suelo se compacta por capas en el interior de un molde cilíndrico, variando de una prueba a otra el tamaño del molde y el espesor de la capa.
- 2) En todos los casos, la compactación propiamente dicha, se logra al aplicar a cada capa dentro del molde un cierto número de golpes, uniformemente distribuidos, con un pisón, cuyo peso, dimensiones y altura de caída, cambian de una variante de prueba a otra. El número de golpes de pisón que se aplica por capa también cambia en las diferentes pruebas.
- 3) En todos los casos, la energía específica se puede calcular con bastante aproximación con el empleo de la siguiente expresión:

$$Ee = \frac{N \times n \times W \times h}{V}$$

Ee= energía específica.

N= número de golpes del pisón compactados por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

W = peso del pisón compactado.

h = altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = volumen total del molde de compactación, igual al volumen total del suelo compactado.

- 4) En todos los casos se especifica el tamaño máximo de partícula que puede contener el suelo, y se eliminan los tamaños mayores por cribado previo a la prueba. Con frecuencia se establece también una especificación relativa al rehuso del material durante la prueba.

Desde luego que como las propiedades mecánicas de los suelos compactados dependen de las condiciones de compactación y las propiedades que son deseables en cierta estructura no necesariamente lo son en otra, resulta irracional el uso de un solo patrón de laboratorio para todas las posibles situaciones de campo.

Con las Tablas N° 3.1 y N° 3.2 se indican en forma resumida, las características de cada uno de los métodos ASTM.

Tabla N°3.1 Diversos Métodos del Ensayo Proctor Estándar

PROCTOR ESTANDARD

ASTM D 698 – 91

Martillo : 2,5+0.01 (Kg) – Altura de caída 30.48± 0.13cm

Método	Método A		Método B		Método C	
	%Ret.	Acum	%Ret.	Acum	%Ret.	Acum
	N°4≤20%		N°3/8≤20% y %Ret. Acum. N°4>20%		N°3/4≤30% y %Ret. Acum. N°3/8>20%	
Molde usado	10.16±0.04		10.16±0.04		15.24±0.07	
Diámetro (cm)						
n° de capas	3		3		3	
N° de golpes por capa	25		25		56	
Volumen del molde (cc)	944±14		944±14		2124±25	
Energía de compactación (Kg.cm/cc)	6.054		6.054		6.027	

Tabla N°3.2 Diversos Métodos del Ensayo Proctor Modificado.

PROCTOR MODIFICADO

ASTM D 1557 -91

Martillo : 4.54± 0.01Kg– Altura de caída 45.72±0.16cm

Método	Método A		Método B		Método C	
	%Ret.	Acum.	%Ret.	Acum	%Ret.	Acum.
	N°4≤20%		N°3/8≤20% y %Ret. Acum N°4>20%		N°3/4≤30% y %Ret. Acum. N°3/8>20%	
Molde usado	10.16±0.04		10.16±0.04		15.24±0.07	
Diámetro (cm)						
n° de capas	5		5		5	
N° de golpes por capa	25		25		56	
Volumen del molde (cc)	944±14		944±14		2124±25	
Energía de compactación (Kg.cm/cc)	27.485		27.485		27.363	

IV.7.2 COMPACTACION POR AMASADO

Un método de compactación por amasado es la prueba denominada “Miniatura” que la desarrolló S.D Wilson en la Universidad de Harvard (EE.UU). En todos los casos se busca reproducir en el laboratorio el efecto típico que tiene lugar en muchos rodillos de campo (pata de cabra y neumático, en menor escala), con el objeto de lograr en el espécimen la misma estructuración interna que adquiere el suelo de campo.

En la prueba “Miniatura” el efecto de amasado se logra al presionar un émbolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con las que se constituye las muestras dentro de un molde, el cual tiene las dimensiones necesarias para formar un espécimen apropiado para la realización de pruebas triaxiales convencionales, así como también, pruebas de compresión no confinada. En cualquier aplicación se transmite el émbolo una presión constante, lo que se consigue, si se adopta un resorte calibrado, que permite saber el momento en que se aplica tal presión.

La evaluación de la energía específica en esta clase de pruebas es muy compleja, pues cada capa de suelo dentro del molde se compacta, mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presión que varía gradualmente desde cero hasta un valor máximo y luego se invierte el proceso en la descarga. La energía de compactación no se puede cuantificar de un modo sencillo, pero puede hacerse variar a voluntad si se introducen cambios en la presión del apisonado, en el número de capas, en el número de aplicaciones del pisón por capa, en el área del pisón o en el tamaño del molde.

A continuación se hará una descripción del procedimiento a seguir en la prueba Miniatura de Harvard:

1) Objetivo de la prueba.

Este método de prueba tiene por objeto determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos finos plásticos, con partículas menores de 2mm; consiste en preparar especímenes con material que pase la malla N°4, al que se le agregan diferentes cantidades de agua. Los especímenes se compactan dentro de un molde metálico bajo la acción de un émbolo que aplica una presión transmitida por la acción de un resorte calibrado.

2) Equipo necesario para la prueba.

- Un molde cilíndrico metálico de compactación, con extensión y placa de base también metálica. Las dimensiones del molde son 3.35 cm (1 5/16") de diámetro interior y 7.1 cm (2.816") de altura; su volumen resulta ser de 62,58 cc (1/454 pie³); la extensión es de 3.5 cm (1.37") de altura.

- Un pisón metálico, con un émbolo en su extremo inferior, que pueda aplicar presión por la acción de un resorte (la presión que se aplica se puede hacer variar dentro de amplias márgenes con el uso de resortes de diferentes constantes elásticas). El émbolo aplicador de presión es una barra metálica de 1.3 cm (1/2") de diámetro, con mango de aluminio; dentro de ésta actúa el resorte comprimido a que se hace referencia.

- Un mecanismo para quitar la extensión del molde, provisto de un émbolo que mantiene al suelo en su lugar durante la extracción.
- Un extractor para retirar del molde la muestra compactada con una alteración mínima.
- Una balanza de laboratorio con aproximación al 0,1 gr.
- Una regla metálica, un horno, malla N°4 y equipo diverso como taras, espátulas, embudos, bandejas, etc.

Este equipo se mandó fabricar el año 1994, para un trabajo de investigación anterior del CISMID, en base a los planos preparados por S. Wilson. Es muy práctico y versátil para determinar densidades máximas en campo y laboratorio con poca cantidad de muestra 1,0 a 1,5 Kg aproximadamente. La calibración del resorte se hizo a 40 lbs de presión, aplicándose a las muestras diferentes número de golpes en 5 capas.

A continuación se presenta un cuadro con los diferentes número de golpes por muestra:

MUESTRA	Nº DE GOLPES
PAMPA DE LOS PERROS	45
CAPA IMPERMEABLE	45
PAMPA DE PERROS I	50
BOTADERO N°6	45
(MUESTRA 1+ MUESTRA 2+ MUESTRA 4)	
PAMPA DE LOS PERROS II -(MUESTRA1+MUESTRA6)	50
-MUESTRA 5	55

Se realizaron los ensayos en 6 muestras obteniéndose densidades de valores menores a los del Proctor Modificado y mayores que la del Proctor Estándar. Respecto a las humedades se obtuvieron humedades cercanas a la del Proctor Estándar y mayores que la del Proctor Modificado.

3) Preparación de la muestra.

- a) Para esta prueba se requiere una muestra de suelo, debidamente cuarteada con peso comprendido entre 1,0 y 1,5 Kg
- b) A la muestra disgregada manualmente se le criba por la malla N°4

- c) Se define la curva peso volumétrico seco y contenido de humedad entre 4 y 5 puntos, se preparará las mismas proporciones de suelos en recipientes con el contenido de agua deseada y dejándose en reposo por lo menos una noche, esto facilita una buena mezcla de agua y los suelos finos. En este caso se trabajó con suelos que absorbían agua con rapidez; la mezcla de agua y suelo se hizo inmediatamente antes de la prueba.
- 4) Procedimiento de la prueba.
 - a) Con el molde ajustado a su base y provisto de su extensión, se coloca en él la cantidad que se requiera del suelo en estado suelto.
 - b) La colocación del suelo dentro del molde deberá hacerse en el número de capas que se desee (en este caso 5); nivelándose cada capa ligeramente con un pistón de hule.
 - c) Después de ajustar apropiadamente el resorte del pistón, se inserta en el suelo el émbolo del pistón y se presiona hasta que el resorte empiece a comprimirse. Se quita la presión, se cambia ligeramente de posición el émbolo y se repite la operación, repartiendo así la presión aplicada de manera uniforme en la superficie de cada capa, hasta completar el número de aplicaciones que se desee; en las muestras ensayadas se aplicaron diferentes números de pisonadas.
 - d) Se repite este procedimiento para cada capa, procurándose que la capa superior sobresalga del molde por lo menos 1 cm (entrando en la extensión metálica del mismo)

- e) Se traslada el conjunto del molde al aditamento para retirar la extensión; presionándose firmemente el émbolo del propio aparato y, a la vez, accionando el extractor, suéltese el collar metálico del molde y del suelo compactado.
- f) Quítese el molde de su base y enrásese con cuidado su borde superior con una regla metálica al igual que el enrasamiento del borde inferior del molde.
- g) Extráigase la muestra del molde utilizando el extractor.

En el caso de determinación del óptimo contenido de humedad, se introducirá la muestra en el horno para los diferentes puntos de la gráfica densidad seca versus contenido de humedad.

IV.8 ANALISIS QUIMICO DE LOS SUELOS

Se realizaron ensayos de análisis químico, para determinar la salinidad, la sodicidad del suelo mediante el cálculo de la Conductividad ELÉCTRICA, EL Porcentaje De Sodio Intercambiable, respectivamente, de acuerdo a estos valores hallados se clasifican los grados de salinidad y sodicidad.

Se empleó un método de ensayo estándar para identificar y clasificar los suelos arcillosos despersivos por medio del ensayo Pinhole. Estos ensayos sirven para identificar las características despersivas de suelos arcillosos que van a usarse o ya han sido utilizados en construcciones de suelo/ tierra.

Los tres procedimientos alternativos para clasificar la dispersión de los suelos arcillosos se especifican en las normas ASTM (D4647-93) y son los siguientes:

1. Método A y método C, clasifican al suelo en seis categorías de dispersibilidad tales como:
Dispersibilidad (D1,D2), ligera a moderadamente dispersiva (ND4,ND3) y no dispersiva (ND2,ND1).
2. El método B clasifica los suelos en tres categorías de dispersidad como
Dispersibilidad (D), ligeramente dispersivo (SD), y no dispersivas (ND).

CAPÍTULO V

ESTABILIZACIÓN DEL SUELO ARENO-ARCILLOSO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CEMENTO

V.1 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DE CAMPO

V.1.1 CANTERA PAMPA DE LOS PERROS

Es un material clasificado arena arcillosa (SC), producto de las excavaciones de las lagunas, de clase extrema de salinidad y clase ligera de sodicidad, este material se tamiza por la malla N° 4, para su empleo en el revestimiento de las lagunas de oxidación.

V.1.2 CAPA IMPERMEABLE DE PIMENTEL

Es un material clasificado arena arcillosa(SC), producto de las excavaciones de las lagunas, de clase extrema de salinidad y clase media de sodicidad, este material es empleado en el revestimiento de las lagunas; se tamiza por la malla N° 4.

V.1.3 BOTADERO N° 6

Este material obtenido de las excavaciones de las lagunas, las muestras se clasifican como arena arcillosa (SC) y grava arcillosa(GC), siendo de clase media de salinidad y variando de clase ligera a media de sodicidad. El material empleado para el revestimiento de las lagunas es tamizado por la malla N° 4.

V.1.4 PAMPA DE PERROS I

Es un material arena arcillosa (SC), producto de las excavaciones de las lagunas, de clase extrema de salinidad y clase extrema de sodicidad, este material se tamiza por la malla N° 4, para su empleo en el revestimiento de las lagunas de oxidación..

V.2 ANÁLISIS DEL AGENTE ESTABILIZANTE CEMENTO PACASMAYO

El cemento Pórtland es un material de color gris a café grisáceo finamente pulverizado, compuesto generalmente por minerales cristalinos, siendo los más importantes los silicatos de calcio y aluminio. Estos minerales, al reaccionar con el agua producen compuestos capaces de asimilar propiedades semejantes a la de las rocas, una vez que se ha endurecido la mezcla cemento y agua.

La mayor parte de las partículas de cemento pasan por la malla N° 200 y su tamaño está comprendido entre 1 a 80 micras. De la fineza y de los compuestos esenciales del cemento depende la velocidad de endurecimiento.

Las materias primas generalmente se obtienen de rocas calizas y arcillas las cuales al ser calcinadas producen el CaO , SiO_2 y Al_2O_3 respectivamente. Se mezcla a las materias primas, a las cuales se ha efectuado un análisis químico previamente, en las proporciones indicadas para obtener el cemento deseado. A veces se adiciona óxido de hierro para tener un cemento de determinada composición. Existen unos elementos que se consideran como impurezas, que son el óxido de magnesio (MgO), de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O).

De acuerdo a la proporción de óxidos de los elementos principales que constituyen elemento se considerará la composición de los cementos.

OXIDO	PROMEDIO(%)	RANGO (%)
Cal (CaO)	63	59 – 65
Sílice (SiO ₂)	22	19 – 25
Alúmina (Al ₂ O ₃)	7	5 – 9
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	3	1 – 5
Magnesio (MgO)	2	1 – 4
Trióxido de azufre (SO ₃)	2	1 - 2

Los principales compuestos de un cemento no se encuentran presentes en forma de óxidos si no por minerales de estructura más compleja aunque bien definidas su naturaleza y formación son temas que en la actualidad presentan controversias. Sin embargo se pueden decir que los 4 compuestos principales del cemento que reaccionan son los siguientes:

Componentes Principales del cemento

NOMBRE DEL COMPUESTO	COMPOSICIÓN	SÍMBOLO
Silicato Tricálcico	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
Silicato Bicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	2CaOAl ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato Tetracalcio	4CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Dentro de los cementos Pacasmayo tenemos 4 tipos dependiendo de cada tipo de necesidad y que se diferencian en las exigencias de ciertos requerimientos máximo y mínimo, tanto físicos como químicos. Ellos son:

- TIPO I (ASTM C-150) :** Para uso general.
- TIPO MS (ASTM C-1157) :** Preparado para concretos en contacto con ambientes húmedos salitrosos, así como en estructuras expuestas a ambientes climáticos húmedo-salinos.
- TIPO V (ASTM C-150) :** Especial para ambientes agresivos.
- TIPO HS (ASTM C-1157) :** Ideal para ambientes severamente agresivos

V.3 PROYECCIÓN DE ESTABILIZACIÓN

Tradicionalmente, las arenas han manifestado una magnífica respuesta a la estabilización con cemento, cuando nos encontramos con arenas y limos que contengan algunas proporciones de minerales arcillosos, es de esperar que las arcillas intervengan también en los efectos de estabilización.

Se ha reconocido que en general la materia orgánica y el exceso de sales en el suelo, especialmente los sulfatos, pueden retardar o evitar la hidratación normal del cemento en las mezclas de suelo y cemento.

La materia orgánica absorbe iones de calcio, entonces primero se agrega calcio en forma de cloruro de calcio o cal hidratada, se satisface a la necesidad de absorción

de iones de calcio en la materia orgánica y en algunos casos se puede obtener un material adecuado para la estabilización. Asumiendo y sintetizando, el Método de la PCA (Portland Cement Association) citado por Fernández Loayza (1982).

Como se puede apreciar en la Figura N° 5.3, primero se hace necesario estimar la importancia relativa de la obra en la que intervendrá el suelo con cemento y con base en ello se seleccionará los métodos de muestreo, preparación y clasificación de suelos. Posteriormente y basándose en lo anterior, se elige el tipo de prueba que debe efectuarse para la determinación de la proporción más adecuada de cemento. La PCA señala 4 procedimientos generales para el proyecto de la mezcla de suelo con cemento, según se indica en la Figura N° 5.3.

Para nuestro proyecto, por ser el más adecuado y práctico siguiendo el método de la PCA, para proyectos importantes, se utilizó el método llamado "corto" que a continuación se detalla. El método llamado "corto" ha sido desarrollado para determinar los contenidos de cemento adecuados para suelos arenosos; aquí se tiene en cuenta cierta inclusión de finos. Se basa en la ejecución de pruebas de granulometría, compactación y resistencia a la compresión simple a los 7 días.

En el método corto se distinguen dos variantes, una de ellas llamada método "A" aplicado a suelos que no contienen material en la malla N° 4 y el método "B" para

los que la contienen . Este método no es aplicable en el caso de suelos orgánicos. No debe aplicarse este método cuando más del 50% pasa la malla N° 200.

En nuestro caso el método “A” es el seleccionado, el cual consiste esencialmente en determinar la granulometría y peso volumétrico seco máximo y óptimo contenido de humedad, en nuestro trabajo se realizó el ensayo Proctor Modificado.

V.3.1 PERMEABILIDAD EN LOS MATERIALES EMPLEADOS

Se empleó un permeámetro de pared rígida, de carga constante aplicado a una presión de 1Kg/cm^2 equivalente a 10m de agua.

La cantera de Pampa de los Perros, resultó con $3.29 \cdot 10^{-4}$ cm/s, esta muestra fue remoldeada al 100% del Proctor Modificado.

GRADO DE PERMEABILIDAD	VALOR DE K (cm/seg)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente impermeable	Menos de 10^{-7}

Tabla 5.3.1 Permeabilidad según Terzaghi y Peck

V.4 ENSAYOS DE LABORATORIO CON ESTABILIZACIÓN POR CEMENTO.

Con el objetivo de proponer una alternativa al lavado de los suelos previstos para la capa impermeable de las lagunas de oxidación, se llevó a cabo un programa de investigación utilizando el cemento como agente estabilizador en proporciones variables.

En primer lugar se fabricaron especímenes compactados con el equipo del Harvard Miniature, a densidades equivalentes a la máxima densidad seca del ensayo PROCTOR modificado realizado originalmente. De este modo se utiliza una menor cantidad de muestra en los ensayos.

Las muestras preparadas con el material de todas las canteras ensayadas, fueron sumergidas en agua después de compactarse, con el resultado de su desintegración inmediata. El efecto fue mayor con el material de Pampa de los Perros U, que tiene un mayor contenido sódico. Esta constatación indica claramente la influencia directa que tiene el sodio sobre la desintegración del suelo compactado sumergido en el agua, lo que confirma el peligro de dicha característica del suelo en la estabilidad de los taludes de los diques sin un tratamiento adecuado.

Se prepararon luego muestras con porcentajes en peso de cemento de 3, 5 y 7%, lográndose muestras resistentes a mayor contenido de cemento, con una tendencia clara a la estabilización de los resultados arriba del 5% para el suelo de Pampa de los

Perros. En Pimentel se perdió resistencia con el tiempo, en Pampa de los Perros I ocurrió lo mismo, en Botadero N° 6 se logró la estabilización con 5% de cemento, lo que ocurrió con Pampa de los Perros es que se logra la estabilización de los resultados por arriba del 5% lo mismo ocurre para Pampa de los Perros III.

Para determinar el efecto del agua de contacto, las muestras compactadas de todas las canteras fueron sometidas a dos tipos de curado diferentes: curado al aire con humedad controlada, es decir se mantenían en conservadores de humedad y curado a saturación por sumersión en el agua. Se programó la ejecución de ensayos de compresión uniaxial a 0, 7, 14 y 28 días de curado y períodos mayores como 2, 4, 5, 6 meses, con los diferentes porcentajes 0, 3, 5, 7% en peso de cemento.

El efecto que produce el cemento tipo MS, sobre los especímenes es la de darle moderada resistencia y un buen comportamiento en el tiempo al suelo-cemento en contacto con el agua.

En los anexos, se presentan los resultados detallados de los ensayos de laboratorio que se encuentran resumidos en la Tabla N° 5.4.

De los valores del cuadro anterior, aparecen las conclusiones siguientes:

En el caso de Pampa de los Perros, para el mismo porcentaje de cemento, el curado por inundación disminuye significativamente la resistencia, en comparación al curado al aire.

- En el caso de Pimentel, para el mismo porcentaje de cemento, el curado por inundación aumenta la resistencia, en comparación al curado al aire;

Con el suelo de Pampa de los Perros, para el mismo porcentaje de cemento, la resistencia aumenta con el tiempo para los dos tipos de curado;

Con el suelo de Pimentel, para el mismo porcentaje de cemento, la resistencia disminuye con el tiempo para el curado al aire y aumenta para el curado sumergido.

En base a los resultados obtenidos con los ensayos de colapso sobre el suelo de Pampa de los Perros y debido a su característica expansiva, se programaron ensayos de expansión libre con las muestras impermeable compactadas y con diferentes porcentajes de cemento. Con porcentajes de 3% o más de cemento, la expansión resultó ser un 10% de aquélla sin cemento. Estos ensayos se ejecutaron en el Laboratorio Geotécnico del CISMID de la UNI y se documentan en el Anexo.

El ensayo se terminó después de alcanzar la estabilización con los porcentajes de cemento, y en vista de requerir resultados inmediatos.

Ensayos de expansión libre sobre el suelo de Pampa de los Perros

Porcentaje de Expansión después de 12755 min de observaciones				
% de cemento	0%	3%	5%	7%
Expansión	15.44%	1.36%	1.20%	1.17%

V.5 EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN POR CEMENTO

V.5.1 CANTERA PAMPA DE LOS PERROS

Para las muestras de la cantera de Pampa de los Perros, por la estabilización del suelo con cemento, se logran aumentos mayores de 3 veces su resistencia a la compresión sin cemento. A partir de 5% de cemento en peso, el aumento de la resistencia no es significativo para incrementos del porcentaje de cemento. Estos resultados se refieren a un curado al aire.

El curado por inundación produce aumentos en la resistencia, aunque en menor proporción. Para un 5% de cemento en peso, se ha logrado un aumento de 1.7 veces la resistencia a la compresión en 28 días. Es posible que con un cemento puzolánico se logren mejores resultados a largo plazo ya que el cemento puzolánico, en comparación con el concreto normal, presenta una mayor ganancia de resistencia con el tiempo.

Los ensayos de colapso y consolidación indican características expansivas para las muestras compactadas de la cantera de Pampa de los Perros. Para la muestra sin cemento, el porcentaje de expansión libre es de 15%. Para porcentajes de cemento en

peso de 3, 5 y 7% , este porcentaje de expansión disminuye a 1.4, 1.2 y 1.15% respectivamente. Esto significa que la estabilización por cemento del suelo de la cantera de Pampa de los Perros, acarrea una reducción de hasta 10 veces la expansión del suelo natural.

Estos últimos resultados tienen una importancia particular en la decisión final para la utilización del suelo-cemento a partir de la cantera de Pampa de los Perros en la construcción de la capa de estanqueidad de los diques, por que indican que no existe una contracción de dicho suelo-cemento después de su colocación y compactación, más bien una ligera expansión susceptible de evitar la aparición de grietas importantes y consecuentemente un comportamiento favorable a su estanqueidad.

V.5..2 CAPA IMPERMEABLE DE PIMENTEL

Los resultados con las muestras de la capa impermeable de Pimentel no han sido tan buenos como los de la cantera de Pampa de los Perros. Con 7% de cemento en peso se logra un aumento de solamente 1.9 veces la resistencia a la compresión en 28 días y con un curado al aire. Además, se notó una disminución de la resistencia con el tiempo en todos los porcentajes de cemento, lo que significa que en este caso la estabilización por cemento queda incierta. Es posible que el porcentaje apropiado de cemento para la estabilización sea mayor que 7% para este suelo. Por otro lado, en el curado sumergido, la resistencia a la compresión es mayor que la del curado al aire.

El ensayo de colapso con la muestra de la capa impermeable de Pimentel indicó que el porcentaje de colapso es pequeño y que este suelo no es expansivo. Este último

comportamiento podría significar contracción del suelo-cemento y posible agrietamiento de la mezcla.

V.5.3 PAMPA DE LOS PERROS II

Para la muestra N°5, por estabilización de suelo con cemento del curado por inundación, de los resultados de resistencia a la compresión obtenidos se observa que no hay incrementos significativos para 3% y 5% de cemento tipo I y Tipo MS.

Para la combinación de la muestra N°1 Y muestra N° 6, se observa que los resultados obtenidos de resistencia a la compresión son valores bajos, para 3% y 5% de cemento tipo MS, los valores de resistencia tienden a disminuir con el aumento de días de curado, esto se debe a que el material es altamente sódico. Los resultados obtenidos empleando el cemento tipo I, para 3% y 5% son relativamente bajos, pero tienden a subir su resistencia para 28 días de curado.

V.5.4 BOTADERO N° 6

Para las muestras de la Cantera de Botadero N° 6, por estabilización del suelo con cemento, del curado por inundación se logran aumentos en la resistencia a la compresión, poco significativos para un 5% de cemento tipo I y tipo MS, y se logran aumentos mayores para un 3% de cemento tipo I y tipo MS, pero con tendencia a disminuir el valor para un curado a 28 días, pero tiende a estabilizarse con el tiempo.

Se determinó por lo resultados de los ensayos que el cemento tipo I, da mejores resultados que el tipo MS.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1 CONCLUSIONES

VI.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

- 1) Se confirma que los suelos propuestos para realizar la capa impermeable de las lagunas de oxidación de San José y Pimentel son extremadamente salinos. Además, son de ligera a medianamente sódicos. El contenido de sodio afecta a la estructura del suelo, que pierde su cohesión en contacto con el agua.
- 2) El lavado simple no eliminará la componente sódica, ya que requiere la adición de un agente químico tal como el yeso, previo al lavado.
- 3) Los resultados a obtenerse siguiendo el método de lavado de suelo son inciertos y caros, por lo que se considera apropiado utilizar alternativas de impermeabilización y mejoramiento de suelo o el empleo de canteras no salinas para el material impermeable.
- 4) No existen canteras de suelo arcillosos no salino- sódico en los alrededores inmediatos de la zona. Por lo tanto, la distancia de transporte sería muy importante para una solución económicamente aceptable.

VI.1.2 CANTERA PAMPA DE LOS PERROS

- 1) La mejor cantera es la de Pampa de los Perros, ya que es menos sódica y está cercana al proyecto. Sin embargo este material es un tanto expansivo, por lo que requiere un tratamiento adecuado.

- 2) Con la adición de cemento se logra aumentar la resistencia a la compresión del suelo y alcanzar su estabilidad, disminuyendo su expansión y mejorando su dispersión ante la acción del agua.
- 3) La adición óptima de cemento puede estar entre 3 al 7%.

VI.1.3 CAPA IMPERMEABLE DE PIMENTEL

Los resultados obtenidos con la capa impermeable no son favorables para su utilización en la construcción de los diques, ya que en el curado al aire, disminuye su resistencia con el tiempo, además, puede contraerse con el tiempo generando agrietamiento.

VI.1.4 CANTERA PAMPA DE LOS PERROS I.

Los resultados de la cantera de Pampa de los Perros I, no son favorables para su utilización en el revestimiento de las lagunas, ya que sumergido disminuye su resistencia con el tiempo y genera agrietamiento.

VI.1.5 CANTERA PAMPA DE LOS PERROS II.

Los resultados que la cantera Pampa de los Perros II, es favorable para su utilización en el revestimiento de las lagunas, ya que con la adición de cemento aumenta su resistencia a la compresión y alcanza su estabilidad, mejorando así su dispersión ante la acción del agua.

VI.1.6 BOTADEROP N°6

Los resultados de la cantera de Botadero N° 6, son favorables para su utilización en las lagunas de oxidación, ya que en el curado sumergido alcanza altos valores de resistencia a la compresión, mejora su dispersión ante la acción del agua y disminuye su expansión.

VI.2 RECOMENDACIONES

VI.2.1 RECOMENDACIONES GENERALES

- 1) Se recomienda sustituir el procedimiento de lavado de los suelos por un suelo-cemento con el material de Pampa de los Perros y Botadero N°6, para realizar la capa de estanqueidad de los diques tanto en San José como en Pimentel.
- 2) El suelo a utilizarse para la mezcla con cemento debe ser el suelo de tipo arena arcillosa de la cantera de Pampa de los Perros, Botadero N°6, homogenizado por una mezcla mecánica general.
- 3) Se recomienda un 7% de cemento en peso para la construcción de la capa de estanqueidad de los taludes y un 5% de cemento en peso para la realización de la capa respectiva del fondo de las lagunas.
- 4) Se admite que la capa impermeable de suelo-cemento propuesta pueda agrietarse con el tiempo; sin embargo los resultados de los ensayos de expansión libre mostraron que existe una ligera expansión de 1.2% de la mezcla de suelo-cemento, favorable a su estanqueidad. Además, la naturaleza de la laguna de oxidación producirá en el fondo y en los taludes un material impermeable que tapaná las posibles grietas.

VI.2.2.LAGUNA DE SAN JOSÉ

Se recomienda realizar la capa impermeable de las lagunas de San José de conformidad con el dibujo presentado en el Anexo N° 7, respetando las características principales siguientes:

Espesor de 25cm sobre los taludes y el fondo de las lagunas anaeróbicas,

- Espesor de 20cm sobre los taludes y el fondo de las otras lagunas,

Colocación de la capa de estanqueidad en suelo-cemento directamente sobre el material del cuerpo del dique.

El material del cuerpo del dique debe ser el material permeable existente en el sub-suelo del sitio de las lagunas, clasificado grava limosa (GM), homogeneizado por una mezcla mecánica general y tamizado hasta obtener menos de 5% de finos (pasa la malla N° 200).

El material del cuerpo de los diques será compactado a una densidad relativa (Dr) mayor de 80%.

VI.2.3 LAGUNA DE PIMENTEL

Se recomienda realizar la capa impermeable de las lagunas de Pimentel de conformidad con el dibujo presentado en el Anexo N°8 respetando las características principales siguientes:

Espesor de 25cm sobre todos los taludes interiores y el fondo de las lagunas,

- Colocación de la capa de estanqueidad en suelo-cemento sobre un solado de arena media gruesa de 15 a 10cm de espesor de acuerdo al dibujo ya mencionado.

El material del cuerpo del dique debe ser el material grueso permeable existente en el sub-suelo del sitio de las lagunas, homogenizado por una mezcla mecánica general y tamizado hasta obtener menos de 5% de finos (pasa la malla N° 200).

El material del cuerpo de los diques será compactado a una densidad relativa (D_r) mayor de 80%.

El nivel de cimentación de los diques será siempre debajo de la capa impermeable existente (más o menos 80cm de la superficie) que se debe eliminar totalmente.