



## II JORNADAS VENEZOLANAS DE RIEGO

CARACAS

22 AL 28 DE MAYO DE 1966

### EL SUELO-CEMENTO COMO UN MATERIAL PARA REVESTIMIENTO DE ACEQUIAS DE RIEGO Y PROTECCION DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA

Por:

Ing. Agr. Gonzalo Decán Guillén

---

DIVISION DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
DE SISTEMAS DE RIEGO

---

# II JORNADAS VENEZOLANAS DE RIEGO

C A R A C A S

22 AL 28 DE MAYO DE 1966

TRABAJO IV-7

*Guillén*

EL SUELO - CEMENTO COMO UN MATERIAL  
PARA REVESTIMIENTO DE ACEQUIAS DE  
RIEGO Y PROTECCION DE TALUDES EN  
PRESAS DE TIERRA

por:

Ing. Agr. Gonzalo Decán Guillén

II JORNADAS DE RIEGO  
DE VENEZUELA

TITULO (\*): "El Suelo-Cemento como un material para revestimiento de acequias de riego y protección de taludes enpresas de tierra".

AUTOR : Ing. Agr. Gonzalo Decán G.

TRADUCTOR : Prof. Darío Velásquez E.

REVISION TECNICA : Ing. Agr. Gonzalo Decán G.

MECANOGRAFIA : Sra. Elina de Castro

---

(\*) El título original de este trabajo es "Soil-Cement as a material for lining irrigation ditches and dam facing". Fue realizado por el autor en la Universidad de California, Davis, U. S. A. como parte de los requisitos de unidades para completar el grado de Maestro en Ciencias de Riego (Master of Science in Irrigation).

# I N D I C E

	Pág.
I. INTRODUCCION .....	1
II. CONSIDERACIONES GENERALES .....	2
Qué es el suelo-cemento ? .....	2
1. Usos del suelo-cemento .....	4
2. Algunas de las ventajas del uso del suelo-cemento .....	6
3. Tipos de suelo-cemento .....	6
4. Características del suelo-cemento .....	7
III. MATERIALES Y METODOS DE ENSAYO DEL SUELO-CEMENTO .....	20
1. Qué materiales se necesitan para el <u>suelo-cemento</u> ? .....	20
2. Métodos de ensayo del suelo-cemento .....	27
IV. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO .....	51
1. Generalidades .....	51
Cómo actúa el cemento en el <u>suelo-cemento</u> ? .....	52
Cuáles son las funciones del agua en el <u>suelo-cemento</u> ? .....	52
Cómo funciona la compactación en el <u>suelo-cemento</u> ? .....	53
Qué cantidad de cemento se utiliza ? .....	54
Qué cantidad de agua es requerida ? .....	55
Cuál es la densidad requerida para la <u>fabricación del suelo-cemento</u> ? .....	56

	Pág.
2. Construcción con suelo-cemento .....	57
A. Preparación inicial del material .....	58
B. Procedimiento .....	59
3. Equipo utilizado en la construcción con suelo-ce- mento .....	66
4. Factores especiales en la construcción. El tiem- po atmosférico .....	70
V. INSPECCION Y CONTROL DE CAMPO .....	73
VI. ALGUNOS TRABAJOS PUBLICADOS SOBRE EL SUE - LO-CEMENTO .....	80
"Revestimiento con suelo-cemento colocado mecánicamente" .....	80
"El suelo-cemento para la estabilización de canales" .....	90
ALGUNOS ASPECTOS SOBRE PROTECCION DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA .....	100
"Especificaciones sugeridas para contratos de trabajos de protección de taludes con suelo-cemento en presas de tierra" .....	102
"La protección con suelo-cemento es retri- butiva" .....	112
VII. BIBLIOGRAFIA .....	117

## I. INTRODUCCION

El propósito principal del presente trabajo es reunir toda la información posible acerca del suelo-cemento como material para la estabilización del suelo. Se trata simplemente de una recopilación y ordenación bibliográfica con fines de despertar el interés por la investigación de este tipo de material para los usos ya señalados en el título del trabajo.

Se dirige especial interés hacia la posibilidad del uso del suelo-cemento en el revestimiento de acequias pequeñas donde otros materiales y métodos de revestimiento no se justifiquen económicamente.

Se describe brevemente la naturaleza del suelo-cemento. Se analizan sus características y usos con el objeto de destacar las posibilidades de utilizar este material para revestir acequias y proteger taludes.

Se establecen líneas guías para indicar los puntos de mayor importancia que sean necesarios para lograr la óptima utilización de los recursos disponibles.

Se consideran y evalúan todas las alternativas prácticas, tanto para la construcción como para los aspectos de diseño.

Se enumeran los métodos para el ensayo del suelo-cemento. Aunque tales métodos fueron desarrollados para el ensayo del suelo-cemento como material para la pavimentación de carreteras, pequeñas modificaciones a los límites de consistencia y de resistencia, permiten que estos métodos de ensayo puedan ser

aplicados al suelo-cemento como material para el revestimiento de acequias.

Se discuten brevemente algunos aspectos importantes de control de calidad e inspección en el campo. También se hacen consideraciones generales, concernientes a la protección de taludes en presas de tierra y al final se incluyen algunas publicaciones sobre esta materia.

El capítulo final del presente trabajo lo constituye la bibliografía consultada.

## II. CONSIDERACIONES GENERALES

Qué es el suelo-cemento ?

Es una mezcla simple muy compactada, de tierra, cemento portland y agua. A medida que el cemento se va hidratando la mezcla se convierte en un material de pavimentación sólido y durable.

Cómo fue desarrollado el suelo-cemento ?

El suelo-cemento fue desarrollado en un esfuerzo por ahorrar dinero en la construcción de carreteras mediante la utilización de tierra en el lugar de la construcción o cerca de él. La idea básica del suelo-cemento no es nueva. A comienzos de 1920 los departamentos estatales de carreteras de Iowa y Dakota del Sur probaron la mezcla de cemento con el suelo de la carretera, y el Departamento de Carreteras del Estado de Ohio usó cemento para reforzar los suelos de la subrasante. Más o menos por la mis

ma fecha California y Tejas construyeron breves secciones de ca  
rreteras con suelo y cemento. Pero para entonces la ciencia del  
suelo aplicada a la construcción de caminos era nueva, y estos en  
sayos produjeron resultados impredecibles y variados.

La labor del Departamento de Carreteras Estadales de Ca  
lifornia del Sur tuvo mucha importancia en el impulso rápido de  
la utilización del suelo-cemento. En 1933-34, el departamento -  
construyó cinco secciones pequeñas con suelo y cemento. Los re  
sultados fueron alentadores, lo cual llevó a una investigación pos  
terior por parte de la Asociación de Cemento Portland. En 1953  
la Asociación cooperó en la construcción de un proyecto experi--  
mental de 1-1/2 millas, esfuerzo compartido por el Departamen-  
to de Carreteras Estadales de Carolina del Sur y la Oficina de Ca  
minos Públicos de los EE. UU. Esta labor impulsó a otros esta -  
dos a construir carreteras de suelo-cemento, y así en 1936 en Mi  
chigan, Illinois, Wisconsin y Missouri fueron construidos proyecc  
tos semejantes.

Comparados con las prácticas de la actualidad los méto -  
dos empleados para construir esos proyectos fueron sumamente  
rudimentarios. No obstante ello casi todas estas carreteras es  
tán en uso todavía. Aunque los métodos y el equipo respectivo -  
han sido mejorados considerablemente los principios de ingenie-  
ría resultantes de estas primeras obras han sido utilizados para  
construir muchos miles de millas de pavimento de suelo-cemento  
en los EE. UU. y Canadá.

Frecuentemente se le aplican otras denominaciones al suelo-cemento, algunas de las cuales son: "base de cemento tratado", "suelo de cemento estabilizado" y "agregado estabilizado". En este trabajo, sin embargo, todas las mezclas de suelo y cemento son llamadas "suelo-cemento".

1. Usos del suelo-cemento

Miles de millas de pavimento de suelo-cemento han sido construidas en EE. UU. y Canadá, así como también en muchos otros países. Aparte de su empleo en la pavimentación de caminos, calles y pistas de aterrizaje, el suelo-cemento tiene las siguientes aplicaciones :

pavimentación de áreas de estacionamiento y similares

remiendo y reconstrucción de bases granulares

capas de base

ensanche de carreteras

bermas laterales

protección de taludes de presas de tierra y bermas

revestimiento de estanques

revestimiento de acequias y canales

La última aplicación es precisamente la que analizaremos en este trabajo.

En el campo de la ingeniería se está encontrando también usos prácticos y económicos para el suelo-cemento en estructuras de drenaje donde se requiera construcción de ba

jo costo y en donde la instalación no esté sujeta a un marcado desgaste por el agua. Tales usos son: revestimiento - de cunetas en carreteras, protección de taludes, revesti-- miento de canales de riego, revestimiento y pisos de estanques y otras aplicaciones similares.

El suelo-cemento ofrece posibilidades de uso como - material de revestimiento de canales en localidades donde los suelos de la subrasante o aquellos adyacentes al canal son de naturaleza arenosa y donde no sea fácil conseguir o tros materiales convenientes.

Las principales razones que determinan el revesti - miento de canales de riego, son las siguientes :

- 1) Se previene la filtración
- 2) Se reduce grandemente el costo de mantenimiento
- 3) Se reducen apreciablemente las pérdidas de opera-- ción
- 4) Es substancialmente más fácil y económica la opera ción del sistema
- 5) Se reduce enormemente el problema de las malezas
- 6) Se controla la erosión

De todas las razones arriba expuestas para el revestimiento de los canales de riego, la enumerada en primer lugar - para prevenir la filtración - resulta ser la de ma- yor importancia en la mayoría de las áreas, y de todos los

métodos de revestimiento de canales de riego, el uso del suelo-cemento puede considerarse como uno de los mejores cuando no se justifican económicamente los otros materiales y métodos disponibles.

2. Algunas de las ventajas del uso del suelo-cemento como material para revestir acequias son las siguientes :

- 1) Bajo costo inicial
- 2) Larga vida
- 3) Construcción fácil y rápida
- 4) Proporcionar gran resistencia

3. Tipos de suelo-cemento

Hay tres tipos generales de mezclas de suelo-cemento :

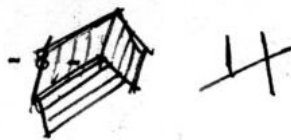
- 1) Suelo-cemento compactado (standard)
- 2) Cemento-suelo modificado
- 3) Suelo-cemento plástico

Los revestidos de suelo-cemento se dividen en dos tipos generales : standard y plástico. El primero contiene cemento suficiente para endurecer el suelo y la humedad necesaria para la adecuada compactación e hidratación del cemento; es compactado con el contenido de humedad de la mezcla cercano a lo óptimo determinado por las pruebas de compactación de laboratorio, agregándose el agua -

al material en el sitio según se requiera. El mezclado del material para el suelo-cemento standard se realiza ordinariamente a través del rastrilleo y paletaje de los dos materiales en el sitio. Se utilizan habitualmente tipos standard de equipos de compactación. El suelo-cemento plástico -- tiene un contenido de agua más elevado que el suelo-cemento standard y una consistencia comparable a la del concreto; puede ser colocado por medio de un encofrado de madera similar al usado en la colocación de revestidos de concreto. El suelo-cemento plástico es mezclado a menudo en una mezcladora móvil tipo molino, recogándose la tierra y el cemento de un camellón formado a lo largo del trayecto del canal. El suelo-cemento compactado es colocado sólo con la humedad suficiente para permitir la adecuada compactación e hidratación del cemento. El suelo-cemento plástico se emplea para pavimentar calles, áreas irregulares o confinadas tales como: revestimiento de cunetas de carreteras y otras estructuras de control de erosión -- donde es difícil, si no imposible, usar maquinarias y equipos de construcción de carreteras.

#### 4. Características del suelo-cemento

Cuando se analice en este trabajo las características del suelo-cemento en el revestimiento de acequias, se hará referencia necesariamente al suelo-cemento en la for--



ma empleada en la construcción de pavimentos, ya que gran parte de la información disponible se encuentra en este campo, y por otra parte, el comportamiento del suelo-cemento no difiere substancialmente cuando es utilizado para revestir acequias.

El suelo-cemento es compactado hasta una alta densidad, endureciéndose la mezcla a medida que se hidrata el cemento. No se consolida excesivamente con el tránsito, ni se asurca o "abre" durante los deshielos de primavera.

El suelo-cemento duro puede formar especies de -- puentes sobre localizadas zonas en las subrasantes flojas o poco resistentes. No se afloja cuando es expuesto a períodos de humedad y sequía extremas o a períodos de congelamiento y deshielo.

Debido a que el suelo-cemento es un material endurecido, cementado y semejante a una losa, tiene gran capacidad para soportar carga. Las pruebas de resistencia -- muestran que el suelo-cemento puede soportar más del doble de carga que otros materiales de bajo costo del mismo grosor.

El cemento en el suelo-cemento continúa hidratándose por un tiempo prolongado. Las muestras tomadas de carreteras con 15 o 20 años de uso muestran una resistencia apreciablemente mayor que las muestras examinadas cuando fue construida la carretera. Esto significa que el

suelo-cemento tiene una "reserva" de resistencia para acomodarse a volúmenes y pesos más elevados de tráfico.

La apariencia en cuanto a color del suelo-cemento no presenta mucha diferencia con la del suelo que, utilizado para su fabricación, es compactado fuertemente en condiciones de humedad y luego secado. En comparación con la tierra, el cemento hace menos susceptible a los efectos de la humedad a la mezcla endurecida. Sin embargo, la mezcla no debe confundirse con el concreto de Cemento Portland. Su resistencia y su módulo de elasticidad son apreciablemente más bajos que los del concreto. Una mezcla satisfactoria de suelo-cemento tiene suficiente resistencia, a cualquier contenido de humedad que haya probabilidad de alcanzar, para resistir el esfuerzo de compresión inducido por cargas del tráfico normal.

Qué formas de grietas se desarrollan en el pavimento con suelo-cemento ?

Durante los primeros días de hidratación del cemento y más lentamente en los meses siguientes, se produce una contracción en el suelo-cemento a causa de la hidratación del cemento y a algo de sequedad que tiene lugar en el suelo-cemento después que se remueve la capa protectora. La cuantía de esta contracción varía ampliamente y aumenta con el contenido de arcilla del suelo. La contracción produce grietas en el suelo-cemento que dan un patrón que va-

ría desde grietas trasversales con una separación de 40 a 1.000 - pies hasta unos tipo bloque, con grietas de 1 a 2 pies de separación, o menos. Sin embargo, en este último caso la mayor parte de las grietas de contracción se profundizan en el suelo-cemento sólo de 1 a 3 pulgadas, estando las grietas más profundas a separaciones de 5 o más pies.

El agrietamiento es una característica natural del suelo-cemento y prueba que el cemento es un material hidratable apropiado para producir un material estructural lo bastante fuerte para permitir agrietamiento. Estas grietas de contracción constituyen la evidencia de la hidratación del cemento y de su resistencia estructural.

La contracción que se produce en el suelo-cemento es generalmente mayor que cualquier incremento de volumen que ocurra posteriormente a causa de los incrementos de humedad y temperatura. Por esta razón las roturas de compresión son tan escasas y pueden ser reparadas a un costo tan bajo que no es necesario o conveniente proveer juntas de expansión para su prevención. Las escasas roturas registradas que se produjeron en proyectos donde se usó arena con elevado contenido de cemento, fueron pocas y con bajo costo de reparación.

#### Qué significa la contracción y la expansión de los suelos ?

Ciertos tipos de suelo presentarán serios cambios de volumen a medida que varía el contenido de humedad del suelo; se - -

contraen con el secado y se expanden con el humedecimiento. Por eso que las características de expansión y contracción son de considerable importancia al seleccionar los suelos que serán usados para la construcción de pavimentos. Se utilizan numerosos términos para describir y medir la cantidad de contracción y de expansión que pueda producirse.

### Límite de contracción

A medida que un suelo se hace menos húmedo, éste se contrae y disminuye de volumen en proporción directa a la pérdida de humedad, hasta alcanzar una condición de equilibrio en la cual no se contrae más, a pesar de que se remueve la humedad adicional. Este punto del contenido de humedad al cual se detiene la contracción se denomina "límite de contracción del suelo" y es reportado como el contenido de humedad determinado por el peso de la muestra de suelo secado en estufa,

Para realizar la prueba para el límite de contracción, se rellena con tierra mojada un recipiente poco profundo, de volumen conocido, y de más o menos 1 pulgada de diámetro (crisol). Se procede a extraer cuidadosamente todo el aire de la muestra por medio de sacudidas, luego es enrasada. Se pesa la muestra, se coloca en una estufa a 110°C (230°F) y se seca hasta obtener un peso constante. Luego se remueve del recipiente y se sumerge en mercurio, determinándose el volumen del mercurio desplazado. De acuerdo a los datos de la prueba se calcula la disminución de -

volumen de la muestra seca y se determina el límite de contracción o contenido de humedad en que se detiene la contracción.

El límite de contracción se calcula por la fórmula :

$$S = M - \left( \frac{V - V_0}{W_0} \times 100 \right)$$

en la cual

S = límite de contracción

M = contenido de humedad del suelo mojado, en porcentaje del peso del suelo secado en estufa

V = volumen de la pasta de suelo mojado, en cm<sup>3</sup>.

V<sub>0</sub> = volumen de la pasta de suelo secado en estufa, en cm<sup>3</sup>.

W<sub>0</sub> = peso de la pasta de suelo secado en estufa, en gramos

Como la arcilla es la parte principal del suelo que origina contracción, el límite de contracción de un suelo es un índice general del contenido de arcilla y, en general, disminuirá con el aumento en el contenido de arcilla. El límite de contracción de las arenas, exentas de arcilla, es denominado "insignificante". Las arenas que contienen algo de limo y arcilla tienen un límite de contracción alrededor de 14 a 25 y el límite de contracción de las arcillas oscila entre 6 y 14. %

La capacidad de un suelo para soportar cargas es máxima cuando su contenido de humedad está en el límite de contracción o por debajo de él. Las arenas no siguen esta regla, ya que ellas --

tendrán una capacidad uniforme para soportar cargas, con un con siderable margen en el contenido de humedad, con tal que estén - confinadas.

### Relación de contracción

La relación de contracción es el cambio de volumen, ex-- presado como un porcentaje del volumen de la pasta de suelo se - co, dividido por la pérdida de humedad por sobre el límite de con tracción, expresado como un porcentaje del peso de la pasta de - suelo seco. Se calcula de los datos obtenidos en la prueba del lí mite de contracción mediante la fórmula :

$$R = \frac{\frac{V - V_0}{V_0} \times 100}{M - S}$$

o por el equivalente

$$R = \frac{W_0}{V_0}$$

donde R = relación de contracción

Teóricamente, la relación de contracción es también la - gravedad específica aparente de la pasta de suelo seco cuando se lleva a cabo la determinación de la contracción; sin embargo, cier tos suelos elásticos se expanden cuando el contenido de humedad - es reducido a cero desde el límite de contracción, la presencia de aire en los poros de un suelo que se está secando puede evitar que se contraiga a una tasa uniforme. Los datos requeridos pueden - obtenerse de la prueba del límite de contracción.

### Contracción volumétrica

La contracción volumétrica se define como el cambio de volumen para un contenido de humedad dado (expresado como un porcentaje del volumen seco) de la masa del suelo cuando el conteni-do de humedad es reducido desde un porcentaje estipulado hasta el límite de contracción. Se calcula partiendo de los datos obtenidos en la prueba del límite de contracción mediante la fórmula.

$$\text{Contracción volumétrica} = Cf = (M_1 - S) R$$

donde

$M_1$  = contenido de humedad dado, usualmente el equivalen-  
te de humedad de campo

$S$  = límite de contracción

$R$  = relación de contracción

Los datos del cambio de volumen se utilizan generalmente para calcular el cambio de volumen que se producirá en un suelo-en el campo cuando éste se seca y pasa de cierta humedad de campo conocida hasta el límite de contracción, o cuando se expande desde el límite de contracción hasta cierta humedad de campo de-terminada, debido a la absorción de agua.

### Contracción lineal

La contracción lineal es la disminución en una dimensión, expresada como un porcentaje de esa dimensión original, de la masa de suelo cuando el contenido de humedad es reducido desde el valor dado hasta el límite de contracción. Puede calcularse con -

los datos provenientes de la prueba del límite de contracción mediante la fórmula

$$\text{contracción lineal} = 100 \left( 1 - \frac{100}{cf + 100} \right)$$

donde

cf = contracción volumétrica

De los datos se pueden obtener ciertas indicaciones acerca de la cantidad de agrietamiento que puede producirse en tales suelos y subrasantes, como resultado del secado.

### Expansión

Se han desarrollado diversos procedimientos de ensayo para medir las propiedades de expansión de los suelos. Los resultados de la prueba se usan principalmente para determinar la profundidad (peso) del material de cobertura requerido para evitar la expansión perjudicial del suelo cuando se emplea en una estructura de pavimento.

Las pruebas de expansión se conducen habitualmente conjuntamente con la prueba de Relación de Estabilidad del suelo (California Bearing Ratio) y la prueba del estabilómetro. En ambos casos, la muestra de la prueba es compactada en un molde hasta una densidad predeterminada, a un contenido apropiado de humedad, y disponiendo de suministro de agua. Se aplican a la parte superior de la muestra sobrecargas de peso igual al del material de cobertura que se encontrará sobre el suelo en la última estructura del pavi-

mento. La expansión que ocurre durante algún período dado de humedecimiento es medida como el cambio real en longitud de la - - muestra, o bien puede medirse por la presión ejercida por el suelo en expansión lo cual se logra mediante la utilización de un ma - nómetro de retracción calibrado. La misma muestra es utilizada luego para la determinación del valor de la CBR o del estabilóme - tro.

Un método de campo rápido, conocido como la prueba "e - quivalente de arena" \*, ha sido desarrollado para descubrir en - los suelos la presencia de materiales indeseables del tipo de las arcillas y materiales de agregados. Este método tiende a ampliar el volumen de arcilla presente en una muestra más o menos en - - proporción a sus efectos perjudiciales.

La prueba "equivalente de arena" es una prueba tipo sedi - mentación en la cual una solución preparada con la muestra del - material que se va a analizar, es agitada suficientemente en un - cilindro de vidrio del 100 ml. Después de dejar reposar por 20 - minutos, las partículas de arcilla y arena se depositan en capas. Las alturas de estas capas son medidas practicando lecturas con una varilla calibrada especialmente. El equivalente de arena - - (SE) se calcula de la siguiente forma :

$$SE = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

---

\* F. N. Hveem : "Sand Equivalent Test for control of Materials During Construction", Proceedings, Highway Research Board, vol.- 32, 1953.

Las arenas para concreto y la piedra triturada tienen valores SE de alrededor de 80, las arcillas muy expansivas tienen valores SE de 0 a 5.

Puede penetrar la humedad en el suelo-cemento terminado ?

Sí, en el caso de que el tiempo atmosférico incluya un ciclo largo de sequía el suelo-cemento se secará completamente, pero al mojarse tomará una cantidad de agua aproximadamente igual al volumen de los poros que van quedando en él a medida que se construye. El cemento le da consistencia a la masa de suelo y evita que la penetración de agua pueda crear un humedecimiento adicional. En consecuencia, este movimiento de agua dentro y fuera del suelo-cemento endurecido no es perjudicial. La humedad se presenta casi siempre en forma de delgadas películas alrededor de las partículas de suelo y de cemento y cuando este tipo de humedad absorbida no se congela fácilmente. Además, el cemento mantiene unida la masa con tanta fuerza que el agua adicional, por encima de la requerida para llenar los poros, no puede penetrar en el suelo-cemento y formar cristales de hielo que disgreguen la masa. Algunas fases de la influencia del agua en el suelo-cemento con el mojado y secado y con la congelación y el deshielo, son similares a las que prevalecen en la madera.

El movimiento de agua dentro y fuera del suelo-cemento originado por las fuerzas capilares no es perjudicial, ya que el volumen de la masa es mantenido relativamente constante por el cemento

to. Como la humedad puede penetrar en el suelo-cemento, y cuando lo hace, no lo ablanda ni lo destruye, es obvio que el agua que penetra a través de las grietas naturales del suelo-cemento no es un problema grave.

Con qué frecuencia requiere el suelo-cemento nuevos tratamientos superficiales bituminosos ?

El tiempo de servicio de superficies bituminosas sobre bases de suelo-cemento ha quedado demostrado que es más largo que sobre bases arenosas, de arenas arcillosas, piedra triturada, caliche y otras similares. Sin embargo, se requiere periódicos tratamientos superficiales para reemplazar el material desgastado por el tráfico. Estos tratamientos puede que no se necesiten hasta en 4 o 5 años, o más.

Cuál es la influencia de las grietas del suelo-cemento sobre las grietas de la superficie bituminosa ?

Gran parte del agrietamiento por contracción trasversal se produce en la base del suelo-cemento en los meses iniciales posteriores a la construcción y constituye un motivo para aplazar la construcción de la superficie bituminosa hasta que ellas se formen. Las grietas por contracción que se producen en el suelo-cemento después que la superficie bituminosa es colocada, usualmente se transmiten a través de la superficie bituminosa. Sin embargo, las superficies bituminosas usadas en muchos casos son de tal carácter que el tráfico hace que se cierren las grietas durante los meses

de verano y reduce el agrietamiento visible. Las prácticas del mantenimiento varían, habiendo muchos ingenieros que prefieren no - - prestarles ninguna clase de mantenimiento a las grietas por el hecho de que con el uso se sellan y el tratamiento bituminoso suave es colocado cada cuatro o cinco años según sea el desgaste ocasionado por el tránsito.

Cuál es el registro de servicio de los proyectos de suelo-cemento en uso ?

En los EE. UU. de Norteamérica han sido construidas en - suelo-cemento más de 85 millones de yardas cuadradas de carreteras, calles y pistas de aterrizaje y aún están en servicio. La primera obra científicamente controlada fue construida en 1935 cerca de Johnsonville, Carolina del Sur, como un proyecto en cooperación de la Administración de Caminos Públicos, el Departamento de Carreteras del Estado de Carolina del Sur y la Asociación de Cemento Portland. Este primer camino de carácter experimental está prestando todavía servicios excelentes y ha requerido muy poco mantenimiento durante muchos años. Los demás proyectos en servicio en otras partes de los EE. UU. demuestran lo indispensable - que es realizar bien los ensayos y cumplir con las especificaciones de la construcción, así como también la excelente utilidad práctica y el bajo costo de mantenimiento del suelo-cemento. Este record es insuperable en el campo de la pavimentación de bajo costo de carreteras de tráfico liviano.

### III. MATERIALES Y METODOS DE ENSAYO DEL SUELO-CEMENTO

#### 1. Qué materiales se necesitan para el suelo-cemento ?

Se necesitan sólo tres materiales básicos : suelo, cemento portland y agua. El bajo costo inicial se logra principalmente mediante el empleo de materiales locales baratos. El suelo, que comprende alrededor del 90% del material para el suelo-cemento, puede ser el que está en el sitio u obtenerse en la cercanía. El agua es acarreada usualmente sólo a cortas distancias.

La palabra "suelo" en la forma usada en el suelo-cemento significa casi cualquier combinación de grava, arena, limo y arcilla, e incluye materiales tales como escorias, caliche, esquisto arcilloso, ganga y muchos materiales de desecho.

Las cantidades de cemento portland y agua que deben agregarse y la densidad a la cual debe compactarse la mezcla se determinan mediante ensayos. El agua sirve a dos propósitos : ayuda a obtener la máxima compactación (densidad) al lubricar las partículas del suelo, y por otra parte es necesaria para la hidratación del cemento, el cual endurece y aglutina al suelo en una masa sólida. El suelo-cemento adecuadamente preparado contiene agua suficiente para ambos propósitos.

Cemento portland. Puede usarse cualquier tipo de cemento portland que cumpla con los requerimientos de las más recientes especificaciones de la ASTM, de la AASHO o de las especificaciones Federales. Los tipos de cemento portland 1 y 1A, normal y aquel en el cual puede penetrar aire, son los usados más comúnmente.

Agua. El agua usada en el suelo-cemento debe ser relativamente limpia y estar libre de cantidades perjudiciales de álcali, ácidos o materia orgánica. El agua apta para beber es satisfactoria. El agua de mar ha sido usada satisfactoriamente cuando no se ha podido obtener agua fresca.

Suelo. Prácticamente todos los suelos y combinaciones de suelos pueden ser endurecidos con cemento portland. No se necesita que sean "agregados" bien gradados, ya que la estabilidad se consigue principalmente a través de la hidratación del cemento y no por cohesión y fricción interna de los materiales. La conveniencia general de los suelos para el suelo-cemento puede juzgarse antes de someterlos a pruebas de laboratorio, en base a su gradación y a su posición en el perfil del suelo.

Gradación. En base a la gradación, los suelos para la construcción del suelo-cemento pueden dividirse en tres amplios grupos:

- a) Suelos arenosos y de grava con alrededor del 10 al 35% de limo y arcilla combinados poseen las características más favorables y generalmente requieren la menor

cantidad de cemento para un adecuado endurecimiento. Las arenas y gravas depositadas en agua y glaciares, las piedras calizas trituradas y sin tamizar, caliche, la roca caliza y casi todos los materiales granulares dan buen resultado, si contienen 55% o más de material que pase el tamiz N° 4. Materiales excepcionalmente bien gradados pueden contener hasta el 65% de la grava retenida en el tamiz N° 4 y poseen suficiente material fino para una adecuada aglutinación. Estos suelos son pulverizados y mezclados fácilmente y pueden utilizarse bajo una amplia gama de condiciones climatólogicas.

- b) Los suelos arenosos deficientes en finos, tales como arenas de playa, arenas glaciales y arrastradas por el viento, sirven para la fabricación de un buen suelo-cemento aunque la cantidad de cemento que se necesita para un endurecimiento adecuado usualmente es algo mayor que con los suelos del grupo a); debido a la pobre gradación y ausencia de finos en estas arenas, el equipo de construcción puede tener dificultades para conseguir su movilización; ésta puede mejorarse notablemente manteniendo mojada la arena y empleando equipo tipo orugas. Estos suelos son aparentemente "tiernos" y requieren un cuidado especial durante el apisonado final y la terminación para que pueda ob-

tenerse una superficie suave y densa.

- c) Los suelos limosos y arcillosos permiten fabricar un suelo-cemento satisfactorio, pero los que poseen elevados contenidos de arcilla son más difíciles de pulverizar. Generalmente mientras más arcilloso es el suelo, mayor es el contenido de cemento requerido para endurecerlo adecuadamente. La construcción con estos suelos está sujeta en grado mayor a las condiciones meteorológicas. Si el suelo puede ser pulverizado, puede considerarse que no es de textura demasiado pesada para su empleo en el suelo-cemento.

El perfil del suelo. Es una sección transversal, vertical desde la superficie de la tierra que muestra los diferentes horizontes o capas del suelo. Cada horizonte de suelo es generalmente de una gradación (textura), estructura y color diferentes. El color indica la composición química del suelo. En algunos casos la gradación del suelo es secundaria a la composición química en la medida en que la reacción del suelo esté ligada al cemento portland. P. ej.: un suelo rojo indica la presencia de hierro y, por lo general, reacciona excepcionalmente bien con el cemento. Al revés, un suelo negro de tierras dedicadas a cultivos puede reaccionar más bien pobremente con el cemento a causa de la presencia de material orgánico.

Algunos suelos superficiales arenosos reaccionan pobremente con el cemento, son de lento endurecimiento y requieren coeficientes de cemento excepcionalmente altos. Pueden considerarse dos medidas correctoras alternativas : (1) reemplazo o bloqueo de la arena de pobre reacción por un suelo que reaccione normalmente; o (2) agregación al suelo arenoso de un pequeño porcentaje de cloruro de calcio, un suelo limoso o arcilloso friable, o un material calcáreo tal como cerniduras de piedra caliza. El cloruro de sodio o el agua de mar pueden ser también efectivos.

Los suelos formados de la misma roca madre y bajo las mismas condiciones climáticas de topografía, drenaje y vegetación son similares. Poseen el mismo perfil de suelo dondequiera que se encuentran. Estos suelos han sido identificados por series de suelo por el Departamento de Agricultura de EE. UU. Los estudios han mostrado que una serie de suelos y un horizonte definidos requerirán la misma cantidad de cemento dondequiera que se les encuentre. Muchas áreas han sido estudiadas y representadas en mapas mediante el uso de este sistema de clasificación; los mapas e informes que acompañan a tales estudios constituyen una valiosa ayuda en la labor de investigación de suelos.

Uso de material de carreteras viejas. Los materiales que se encuentran usualmente en carreteras viejas de grava o piedra caliza permiten fabricar un excelente suelo-cemento. Generalmente son friables, se mezclan fácilmente y requieren sólo una canti-

dad mínima de cemento. Frecuentemente si está presente la carpeta vieja ella puede aprovecharse o ser pulverizada y mezclada con la base vieja del material grueso para procesarlo con el cemento.

Uso de suelos de préstamo. Desde un punto de vista de la construcción o del costo, a veces es ventajoso usar un suelo de préstamo seleccionado, en vez del suelo en el sitio. El suelo existente o los suelos con los que se tropieza al practicar las secciones de corte pueden tener un contenido de arcilla muy elevado y requiere un coeficiente de cemento relativamente alto. También puede requerirse un esfuerzo considerable para pulverizar adecuadamente estos suelos. Los depósitos de suelos friables o granulares que requieren mucho menos cemento y muy poca pulverización pueden a menudo encontrarse en las inmediaciones y pueden emplearse para cubrir el suelo existente o pueden combinarse con él. A menudo se usa una gradación selectiva para colocar los suelos más favorables en la parte superior del gradiente. Las estimaciones del costo comparativo indicarán los suelos de uso más económico.

Cuando se presentan arcillas que requieren contenido de cemento de un 16% o más, el ingeniero de pavimentación prepara un estudio de costos de construcción de suelos arcillosos en sitio y suelos de préstamo para determinar si el uso de la arcilla en el sitio con sus requerimientos de cemento será más económico que el uso de un suelo de préstamo, llevado hasta la obra, con un requere-

rimiento más bajo de cemento.

Las pruebas standard de la ASTM, los ensayos de la AASHO y los criterios de pérdida del suelo-cemento determinarán los re querimientos de cemento. Establézcase en 18% para la arcilla en sitio como un caso ilustrativo. El próximo paso consiste en ubi - car un depósito de suelo friable o una arena o un depósito de gra - va en el área o quizás una cantera en las inmediaciones que tenga algo de recortes de desecho o una planta de grava con algo de are na sobrante que pueda ser utilizada. Es probable que un río de la vecindad tenga cantidades de arena o arena limosa en bancos que pueda ser obtenida económicamente con una draga. Habitualmen - te la naturaleza proporciona suelos friables en la mayoría de la s áreas, aunque en algunos casos pueden estar a 3 o 4 pies bajo la - superficie y se necesitaría un ingeniero de suelos para localizar - las. En cualquier caso, el objetivo es encontrar un suelo friable conveniente que se endurezca satisfactoriamente con un 10% de ce mento aproximadamente. En este estudio del costo, esto da una diferencia del 8% de cemento en requerimientos para los dos sue - los. Estimando el costo del cemento en cinco céntimos de dólar por yarda cuadrada, para cada unidad de porcentaje del contenido de cemento en un pavimento de 6 pulgadas, da una diferencia de - 40 céntimos en los costos del cemento para los dos suelos. Este dinero puede utilizarse para costear el acarreo del suelo que re - quiere el 10% de cemento y se determina así lo que se puede gas - tar económicamente para el suelo de préstamo.

Sucedirá muchas veces que es más económico y práctico localizar suelos friables con requerimientos promedios de cemento y utilizarlos como una cubierta sobre la arcilla, que procesar la arcilla que requiere más cemento y también más trabajo en su pulverización.

En algunos casos la arcilla puede ser diluida con gravas, arenas y suelos friables, reduciéndose así la cantidad de material que debe traerse de otro sitio.

## 2. Métodos de ensayo del suelo-cemento

La experiencia de laboratorio y de campo durante más de 20 años ha mostrado en forma concluyente que los suelos pueden ser endurecidos adecuadamente mediante la adición de cantidades relativamente pequeñas de cemento portland, produciendo un material fuerte y durable, conveniente para la pavimentación de bajo costo. Uno de los factores clave que intervienen en la aplicación acertada del suelo-cemento al campo de la pavimentación es la cuidadosa predeterminación de los factores de control de ingeniería en el laboratorio y su aplicación a través de toda la construcción. La observancia de este principio ha determinado la alta calidad y uniformidad de las miles de millas de pavimento de suelo-cemento.

La composición de los suelos varía considerablemente, lo cual afecta el grado en que reaccionan cuando se les combina con cemento portland y agua. La forma como reacciona el cemento -

con un suelo dado se determina mediante sencillas pruebas de laboratorio realizadas en mezclas de cemento con el suelo. La cantidad de pruebas de laboratorio requeridas para un proyecto dado depende de los requerimientos del organismo constructor, el número de tipos de suelos con que se ha de trabajar, la magnitud de la obra y otros factores similares.

En los proyectos mayores, por ejemplo, se requieren generalmente ensayos detallados y el mínimo de contenido de cemento que pueda usarse con seguridad es determinado para cada tipo de suelo de importancia en la obra. Los laboratorios de los departamentos estatales de carreteras y muchos otros, están bien equipados para llevar a cabo ensayos completos y detallados. El costo de las pruebas de laboratorio para los proyectos de gran magnitud es pequeñísimo en comparación con el costo total del proyecto.

En proyectos más pequeños, particularmente donde las facilidades para ensayo y mano de obra son limitadas, se considera a veces ventajoso realizar sólo los ensayos de laboratorio suficientes para determinar el factor de cemento de seguridad, pero no necesariamente el mínimo, que pueda emplearse para la construcción.

Para construcciones de emergencia y para proyectos muy pequeños donde no se disponga de facilidades de laboratorio para ensayo o donde las pruebas detalladas no sean factibles o prácticas, se ha aplicado con éxito un procedimiento de ensayo rápido y muy sencillo que comprende el moldeo e inspección de muestras. Ello

proporciona un factor de cemento seguro, pero que puede ser apre  
ciablemente más alto que el mínimo para una dureza adecuada.

Los diversos métodos de ensayo se muestran gráficamente -  
en la fig. 1.

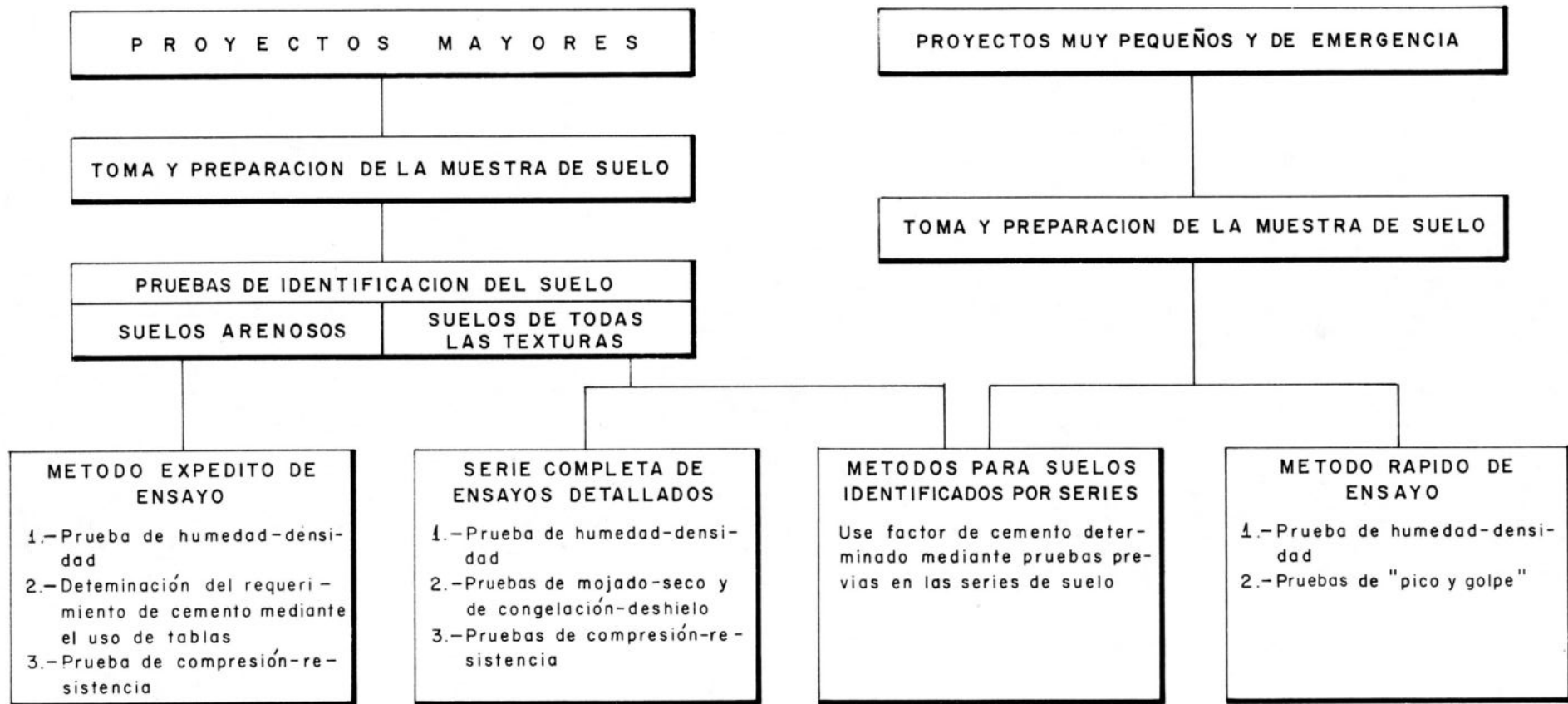


Fig. 1- Métodos de ensayos de laboratorio para suelo-cemento

En algunas áreas se han desarrollado métodos y criterios especiales de ensayo específicamente para condiciones locales. Estos métodos de ensayo desarrollados localmente han mostrado ser también satisfactorios para los suelos y climas comprendidos en esas áreas.

En todos los casos los ensayos se llevan a cabo para determinar tres requerimientos fundamentales en el suelo-cemento :

1. Cuánto cemento portland se necesita para endurecer adecuadamente el suelo ?
2. Cuánta agua debe agregarse ?
3. Hasta qué densidad debe ser compactado el suelo-cemento ?

Métodos detallados de ensayo para determinar estos factores de control fueron aprobados por la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales en 1944 y por la Asociación Americana de Funcionarios de Autopistas Estadales en 1945. Después de 13 años de -- buenos resultados, los métodos de ensayo fueron revisados por la ASTM y por la AASHO en 1957 para incorporar la información y la experiencia ganadas durante ese período. Las revisiones reducen sustancialmente la cantidad de trabajo y cálculo requeridos para el ensayo de rutina. Estos métodos de ensayo son :

Métodos de Ensayo para las Relaciones de Densidad-Humedad de Mezclas de Suelo-Cemento, Designados por la ASTM : D 558-57; y por la AASHO : T 134-57.

Métodos de ensayo de Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento compactado. Designados por la ASTM : D 559-57; y por la AASHO : T 135-57.

Métodos de ensayo de Congelación y Deshielo de las Mezclas de Suelo-Cemento compactado, Designados por la ASTM : D 560-57; y por la AASHO : T 136-57.

La seguridad de estos métodos de ensayo ha quedado demostrada por el record de servicio permanente de pavimentos de carreteras, calles y algunos aeropuertos, áreas de estacionamiento y proyectos similares que fueron construidos utilizando factores de control obtenidos mediante estos métodos de ensayo. Pero, a pesar de lo valioso que resultan los métodos de ensayo, se requiere un tiempo considerable para obtener los factores que se necesitan para la construcción. En un esfuerzo continuado para reducir el tiempo y la mano de obra requeridos para las pruebas de laboratorio, la Asociación de Cemento Portland ha desarrollado un procedimiento especial de ensayo expeditivo para la determinación de los coeficientes o factores del cemento para suelos arenosos.

En el caso del suelo-cemento compactado, los métodos de ensayo establecidos por la ASTM-AASHO se utilizan para determinar las cantidades apropiadas de cemento y humedad y la densidad a la cual debe ser compactada la mezcla.

El contenido óptimo de humedad y la densidad máxima son determinados primero. El contenido apropiado de cemento es de

terminado luego por los ensayos de seco-mojado y de congelación-deshielo en muestras representativas que contengan diferentes can-  
tidades de cemento portland. Las muestras de ensayo son moldea-  
das a la humedad óptima y son compactadas a la densidad máxima.

Los datos provenientes de estos ensayos indican la cantidad mínima de cemento requerido para producir el suelo-cemento que se ajuste al margen de pérdidas de peso permisible (mostrado en la Tabla 1) y que sea de durabilidad y dureza satisfactorias. Para obtener una superficie más resistente a la erosión del agua se re-

T A B L A 1

Pérdidas permisibles de Suelo-cemento durante 12  
ciclos de la Prueba Mojado-Seco o de la Prueba -  
Congelación-Deshielo

---

---

Grupo de Suelo *	:	A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-5, hasta 14%
" " "	:	A-2-6, A-2-7, A-4 y A-5, hasta 10%
" " "	:	A-6, A-7-5 y A-7-6, hasta 7%

---

---

\* Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos.

comienda que los requerimientos mínimos de cemento, establecidos por las pérdidas de peso permisibles en la tabla de arriba, -  
sean aumentados en dos unidades de porcentaje para suelos que -  
contengan menos del 50% de limo y arcilla combinados. Para sue-  
los que contengan 50% o más de limo y arcilla combinados se reco-  
mienda que el contenido de cemento sea aumentado en cuatro uni -

dades de porcentaje.

En el caso del suelo-cemento plástico el contenido apropiado de humedad es determinado haciendo dosificaciones tentativas de la mezcla de suelo-cemento a diversos contenidos de humedad hasta que se alcance la consistencia plástica deseada. La densidad a este contenido de humedad es determinada luego colocando la mezcla en el molde de humedad-densidad y determinando el peso seco por pie cúbico. La mezcla es colocada en tres capas; los espacios grandes llenos de aire son removidos de cada capa mediante el uso de alguna varilla y la compactación de cada capa se obtiene dejando caer tres veces el molde y la mezcla sobre una superficie sólida y firme desde una altura de 1 pie.

Luego se determina el contenido apropiado de cemento por los resultados de las pruebas de seco-mojado y congelación-deshielo en muestras representativas de suelo-cemento moldeadas al contenido de humedad plástico. El contenido de cemento requerido para producir suelo-cemento de dureza y durabilidad satisfactorias es el que obtenga resultados que se ajusten a la Tabla 1. Para obtener una superficie más resistente a las fuerzas de erosión del agua, se recomienda que el contenido de cemento determinado por las pruebas sea aumentado en dos unidades de porcentaje.

### Métodos de Ensayo ASTM-AASHO

#### Prueba de Densidad-Humedad

Esta prueba se utiliza para determinar el contenido apropia -

do de humedad y la densidad (denominado el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima) para moldear las muestras de ensa -  
yo de laboratorio. Se usa también en el campo durante la construcción para determinar la cantidad de agua que debe agregarse y la -  
densidad a que debe compactarse la mezcla.

La prueba de densidad-humedad para una mezcla de suelo-cemento determina la relación entre el contenido de humedad de la -  
mezcla de suelo-cemento y la densidad resultante cuando la mezcla  
es compactada antes de la hidratación del cemento por una fuerza -  
compactadora uniforme. En la fig. 2 se muestra una curva típica -  
de densidad-humedad.

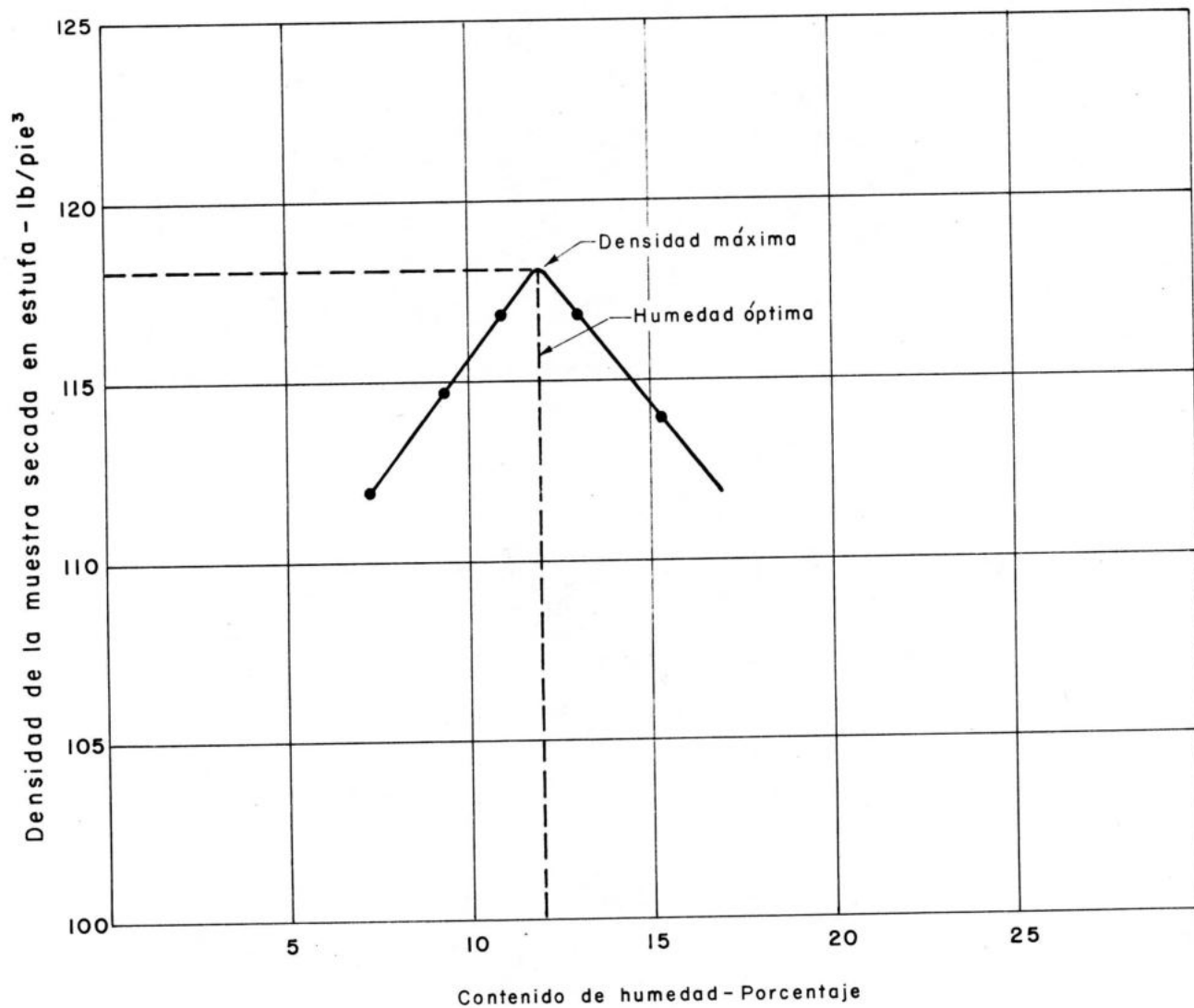


Fig. 2.-Curva típica de Densidad - Humedad

Mientras se están mezclando el suelo, el cemento y el agua, ocurre un cambio muy notable en la mezcla. Aparentemente se trata de un fenómeno de intercambio de bases (cationes). El suelo es más o menos coagulado, lo cual origina un aumento en la fricción interna.

Por lo tanto, las relaciones humedad-densidad de una mezcla de suelo-cemento variarán ligeramente como resultado de este fenómeno químico y de la hidratación parcial del cemento que se ha producido durante la mezcla por humectación. Estos efectos serán notados tanto por un aumento en el contenido óptimo de humedad y una disminución en la densidad máxima de la mezcla de suelo-cemento como por la medida en que aumenta el tiempo del mezclado por humectación. Por esta razón las pruebas de humedad-densidad en el laboratorio se hacen lo más rápido posible a las mezclas de suelo-cemento. Esto es necesario debido a que las muestras para las pruebas las cuales son diseñadas partiendo de estos datos de ensayo, son moldeadas después de unos pocos minutos de haber mezclado el suelo, el cemento y el agua, y antes de la hidratación del cemento.

Las especificaciones para la construcción en suelo-cemento requieren que las relaciones humedad-densidad sean establecidas en el campo, hacia el final del procedimiento de mezcla por humectación, con el uso del suelo-cemento tomado directamente del área que se está construyendo. Si se considera necesario, se pueden realizar pruebas de laboratorio de humedad-densidad

del suelo-cemento que simulen o consideren el tiempo requerido - en las operaciones de mezclado en el campo. Los resultados que se obtengan se aproximarán estrechamente a la humedad óptima - de campo y a la densidad máxima reales.

Durante la construcción, la estimación de los requerimientos de agua se basan en las pruebas de humedad-densidad efectuadas - en el laboratorio tomando como índice el momento en que la mez--cla esté muy próxima al punto óptimo de humedad. La estimación correcta será aquella correspondiente al valor de humedad óptima que muestre poca o ninguna variación en cantidad al tiempo de compactación.

(Detalles de la realización de la prueba de humedad-densidad pueden encontrarse en el Capítulo 3, página 19, del Manual de La - boratorio del Suelo-cemento, publicado por la Asociación de Cemento Portland).

#### Prueba de Seco-Mojado

La mayoría de las mezclas de suelo-cemento tienen suficien- te estabilidad para soportar el tráfico local inmediatamente después de ser compactado a la densidad máxima con el contenido de hume- dad óptimo. A medida que comienza la hidratación del cemento, la estabilidad del suelo-cemento aumenta sustancialmente. Las prue- bas de seco-mojado y de congelación-deshielo fueron diseñadas ori- ginalmente para determinar si el suelo-cemento endurecido perma- necería duro o si el material se ablandaría por la exposición a va-

riaciones severas de la humedad y a la alternación de congelamiento y deshielo, condiciones éstas que han producido resultados desastrosos en el suelo solo.

La prueba de seco-mojado (sequía y humedad alternas) es particularmente estricta en muestras de suelo-cemento que tienen contenidos relativamente altos de limo y arcilla. El ciclo de secado origina elevadas tensiones de contracción en las muestras. Estas tensiones se interrumpen cuando se inicia el mojado, estableciéndose altas tensiones por expansión superficial. Luego se procede a quitar con cepillo el material suelto al final del período seco de cada ciclo.

La prueba de seco-mojado es también realmente estricta en las muestras de suelo-cemento que contienen arenas de un solo tamaño. El cepillo de alambre con que son cepilladas después del ciclo de secado actúa como una herramienta de abrasión drástica, no sólo al remover el material suelto que se origina durante el ciclo de mojado y secado alternos, sino también al aflojar los granos adicionales de arena. Esta fuerte abrasión se toma en consideración cuando los contenidos de cemento son seleccionados para el endurecimiento de suelos; p. ej. : se permiten pérdidas mayores de suelo-cemento para las mezclas de suelo-cemento arenoso endurecidas satisfactoriamente que para mezclas de suelo-cemento arcilloso en las mismas condiciones.

El procedimiento usado en la prueba seco-mojado del suelo-cemento se da en detalle en el Capítulo 3, página 28, del Manual

de Laboratorio del Suelo-cemento, publicado por la Asociación de Cemento Portland.

### Prueba de Congelación-Deshielo

Esta prueba (congelación y deshielo alternos) fue concebida para medir el efecto endurecedor del cemento portland sobre los suelos. La prueba muestra no sólo cómo reacciona el suelo-cemento a los elementos del tiempo sino, lo que es aún más importante, muestra si el cemento ha endurecido verdaderamente o no al suelo.

La prueba de congelación y deshielo alternos es particularmente estricta en las muestras de suelo-cemento moldeadas con suelos dentro del rango textural de arenosos a franco arcillo-limosos. En las mezclas de suelo-cemento arenoso, la prueba muestra definitivamente si el cemento reacciona favorablemente y si tiene suficiente poder de cementación para superar la expansión del agua en los poros del suelo-cemento a medida que se congela el agua. En las mezclas de suelo-cemento que contengan suelos francos, franco-limosos, y franco arcillo-limosos, la prueba determina :

1. Si hay cemento suficiente en las muestras para superar la fuerza expansiva del agua que se congela en los poros.
2. Si hay cemento suficiente en las muestras para superar la formación de capas de hielo.

El procedimiento usado en la prueba de congelación-deshielo del suelo-cemento aparece en el Capítulo 3, página 29, del Manual de Laboratorio del Suelo-cemento. Esta prueba está limitada sólo a aquellas regiones donde los elementos del clima originan las condiciones de congelación y deshielo que se mencionan.

#### Procedimientos expeditivos de ensayo para suelos arenosos

Estos procedimientos han sido desarrollados para determinar el contenido adecuado de cemento para ser mezclado con suelos arenosos\*. Esos procedimientos no implican pruebas nuevas o equipo adicional; por el contrario, los datos y tablas desarrollados en ensayos anteriores con suelos similares son utilizados para eliminar algunas pruebas y reducir grandemente la cantidad de labor requerida. Las únicas pruebas de laboratorio requeridas son: un análisis del tamaño de las partículas, una prueba de humedad-densidad y pruebas de resistencia a la compresión. Se necesitan muestras de suelo relativamente pequeñas y todas las pruebas, excepto la prueba de resistencia a la compresión a los 7 días, pueden completarse en 1 día.

---

\* "La Correlación de los Datos de Ensayo del Suelo-Cemento proporciona Métodos para la Rápida Determinación de los Factores de Cemento para Suelos Arenosos" en el Boletín 61, págs. 29, 46, 1952 del Departamento de Investigación de Carreteras. También "Métodos - Expeditivos Ampliados de Ensayo para la Determinación de los factores de Cemento para Suelos Arenosos", un segundo trabajo que incluye información más reciente, fue presentado en la 37<sup>a</sup> Asamblea Anual del Departamento de Investigación de Carreteras, Enero de 1958.

Aunque estos procedimientos no dan siempre el factor mínimo de cemento que puede usarse, proporcionan un coeficiente de cemento seguro, generalmente muy próximo al indicado por las pruebas standard de la ASTM-AASHO (seco-mojado y congelación-deshielo). Los ingenieros y constructores les están encontrando amplia aplicación y pueden reemplazar en gran parte las pruebas standard a medida que se gane experiencia en su uso y se verifiquen algunas relaciones. Posiblemente las tablas y procedimientos pueden ser modificados para su adaptación a las necesidades locales, si así se requiere.

Estos procedimientos son analizados detalladamente en el Capítulo 6, página 38, del Manual de Laboratorio del Suelo-cemento.

#### Procedimiento rápido de ensayo

Se ha usado con éxito un método rápido de ensayo del suelo-cemento para construcción de emergencia y para proyectos muy pequeños donde no son factibles o prácticas pruebas más completas. El método implica el moldeo y la inspección visual de numerosas muestras que cubren una amplia gama de contenidos de cemento, p. ej.: 10, 14 y 18%. Después de por lo menos, 1 o 2 días de endurecimiento, las muestras son inspeccionadas y se punzan con un instrumento de punta afilada y mediante el sonido (nítido "tintineo") que produce cada muestra al ser golpeada suavemente contra un objeto endurecido, p. ej.: concreto, se determina la dureza relativa. Si una muestra no puede ser penetrada más de 1/8 a 1/4 pulgada y si produce un sonido claro o sólido al ser golpeada, se puede estable

cer que tiene un factor de cemento adecuado.

Aún una persona sin experiencia puede diferenciar pronto entre las muestras satisfactoria e insatisfactoriamente endurecidas y será capaz de seleccionar un contenido seguro de cemento para endurecer el suelo.

El procedimiento rápido de prueba se estudia con más detalle en el Capítulo 7, página 43, del Manual de Laboratorio del Suelo-cemento.

#### Ensayos en suelos identificados por series

Un instrumento muy útil para el ingeniero, al reducir el trabajo en los ensayos del suelo-cemento, es la identificación de los suelos mediante el sistema de clasificación de suelos del Departamento de Agricultura.\* En este sistema de clasificación los suelos son sub-

---

\* El sistema de clasificación de suelos del Departamento de Agricultura es descrito en la Cartilla de Suelos de la PCA publicado por la Asociación de Cemento Portland, que se puede conseguir gratuitamente solo en EE. UU. y Canadá. Constituyen excelentes referencias las siguientes publicaciones :

1. "Suelos de los EE. UU.", Atlas de Agricultura de EE. UU. de Norte América, III Parte. Departamento de Agricultura de EE. UU., 1953.
2. Charles E. Kellogg, Desarrollo e Importancia de los Grandes Grupos de Suelos de los EE. UU. Publicación Miscelánea del Departamento de Agricultura de los EE. UU., N° 229, 1936.
3. Departamento de Agricultura de EE. UU., Anuario de Agricultura, 1938 Los Suelos y los Hombres.
4. H. Jenny, Factores de la Formación del Suelo. Nueva York, McGraw-Hill Book Co.,
5. F. F. Riecken y Guy D. Smith, "Categorías Inferiores de Clasificación de suelos: Familia, Serie, Tipo y Fase", pág. 107, y Games Thorp y Guy D. Smith, "Categorías Superiores de la Clasificación de Suelos: Orden, Suborden y Grandes Grupos de Suelos" pág. 117, Ciencia del Suelo, vol. 67, enero a junio de 1949.
6. Manual de Estudio de Suelos. Depart. de Agric. de EE. UU., Manual - N° 10, 1951.

divididos en grupos llamados serie de suelos. Los suelos pertenecientes a cierta serie poseen características similares de subsuelo (horizonte B), roca madre (horizonte C); clima, vegetación y edad. Extensas áreas pueden estar cubiertas por suelos de la misma serie.

La identificación de suelos por nombre de serie es importante en el trabajo con suelo-cemento porque se ha encontrado que los suelos del mismo horizonte y serie requieren la misma cantidad de cemento para un adecuado endurecimiento. Una vez que ha sido determinado, mediante pruebas de laboratorio, el requerimiento de cemento para suelos de un horizonte y una serie determinados no se necesita realizar nuevamente pruebas completas para esta serie particular de suelo cuando ella se presente de nuevo.

La necesidad de llevar a cabo las pruebas del suelo-cemento pueden reducirse bastante o aún eliminarse para amplias áreas, si tenemos identificados los suelos por series. Un número creciente de ingenieros están usando este sistema de clasificación para reducir su trabajo de ensayo del suelo-cemento. Se han llevado a cabo estudios de suelos en una gran extensión del territorio de los EE. UU. y el Departamento de Agricultura ha preparado mapas de suelos de suma importancia para este tipo de estudios.

La Sección de Investigación de Carreteras informa periódicamente del estado de la confección de mapas de suelos realizada por el Departamento de Agricultura y otros organismos a través de publicaciones respaldadas por el Comité de Estudios de Suelos

y de Confección de Mapas. Estas publicaciones enumeran los estudios de suelos completados y los iniciados desde la publicación precedente, suministrándole así al ingeniero la más reciente información sobre estudios de suelos y confección de mapas.

Los ensayos de tamaño de partículas y de constantes físicas del suelo son también útiles en la identificación y clasificación de suelos y los datos pueden ser utilizados ventajosamente en conjunción con el sistema de identificación de serie de suelos. Estas pruebas proporcionan también información adicional que permite al ingeniero de la construcción identificar en el proyecto los diversos tipos de suelos que fueron ensayados en el laboratorio.

#### Selección del contenido de cemento para los ensayos

Este capítulo será del mayor interés para el ingeniero dedicado a las actividades de laboratorio pues le ayudará en la determinación de la cantidad de cemento a utilizar en las pruebas de suelo-cemento. También les interesará al ingeniero de campo y al ingeniero administrador, ya que se discuten las propiedades de las mezclas de suelo-cemento y las relaciones existentes entre esas propiedades y los diversos valores de las pruebas. Se presenta información que posibilitará a los ingenieros la estimación de los coeficientes de cemento probables de tal modo que las estimaciones de la labor puedan hacerse antes de efectuar cualesquiera pruebas.

A fin de obtener la máxima cantidad de información de las pruebas de seco-mojado y de congelación-deshielo, es importante

que el ingeniero del laboratorio diseñe apropiadamente las muestras de suelo-cemento. Por ejemplo: si las muestras están diseñadas con contenidos de cemento muy elevados todas pasarán las pruebas de seco-mojado y de congelación-deshielo; y no se habrá determinado un coeficiente mínimo de cemento. Por otro lado, si las muestras son diseñadas con contenidos de cemento inadecuados, fallarán todas en las pruebas.

El principal requerimiento de una mezcla endurecida de suelo-cemento es que soporte la exposición a los elementos del clima. La resistencia podría considerarse también como un requerimiento principal; sin embargo, como la mayoría de las mezclas de suelo-cemento que soportan bien los elementos del clima poseen también adecuada resistencia este requerimiento es secundario.

En consecuencia, en un estudio para determinar cuándo cierta mezcla de suelo-cemento ha sido debidamente endurecida, el requerimiento de la adecuada resistencia a la exposición es lo que se considera en primer lugar. Es decir, soportará la mezcla endurecida de suelo-cemento el humedecimiento y secado, así como los ciclos de congelación y deshielo de la naturaleza y mantendrá todavía al menos la estabilidad inherente a la masa en el momento en que la carretera sea abierta al tráfico ?

Considérese, p. ej. : una subrasante hipotética de carretera, construida con un suelo franco arcilloso sin cemento, comprimido a la máxima densidad y a un contenido de humedad ligeramente menor al óptimo. Esta masa puede soportar cargas relativamente

te pesadas sin fallar, aunque no puede ofrecer mucha resistencia a las fuerzas abrasivas.

El mismo suelo mezclado con cemento y compactado a la máxima densidad con el óptimo contenido de humedad tendrá estabilidad antes, de que se hidrate el cemento, al menos igual a la del suelo natural.

Pero considérese los dos casos en una fecha posterior bajo condiciones de drenaje lento, cuando la humedad, por acción capilar o de alguna otra manera, ha impregnado las masas. Los poros del suelo natural se llenan de agua y el suelo pierde la estabilidad física original que fue originada en él por compactación a la densidad máxima. No sucede así, sin embargo, con la mezcla de suelo-cemento adecuadamente endurecida, la cual va incrementado continuamente su estabilidad desde el momento de su construcción, debido a la hidratación del cemento y a la cementación resultante. Los espacios porosos también se llenarán de agua, pero su estabilidad seguirá siendo aún mucho mayor que la conseguida en él originalmente.

El requerimiento siguiente en importancia que se debe considerar es el aspecto económico. Los datos disponibles indican que alrededor del 85% de todos los suelos susceptibles de ser usados para la fabricación del suelo-cemento, pueden ser endurecidos adecuadamente mediante la adición del 14% de cemento o menos. Para determinar si un suelo cae o no en esta categoría no se requerirían muchos ensayos. Sin embargo, más del 50% de todos los sue-

los hasta ahora ensayados para el suelo-cemento requieren sólo el 10% de cemento o menos para un adecuado endurecimiento. Para identificar estos suelos se requiere más ensayos. Como el suelo--cemento es un material incluido en el campo de la pavimentación de bajo costo, el ingeniero que realiza los ensayos en amplia escala - debe determinar mediante pruebas la cantidad mínima de cemento que puede usarse con seguridad con cada suelo. Por este procedi- miento será posible obtener la mejor información para la construc- ción con suelo-cemento al más bajo costo.

Cómo se determinan los requerimientos de cemento para cada sue- lo ?

La proporción de cemento requerido por cada tipo de suelo para producir una mezcla satisfactoria de suelo-cemento, se deter- mina a partir de los resultados de las pruebas llevadas a cabo bajo condiciones de laboratorio cuidadosamente controladas.

La siguiente información ayudará al ingeniero en la estima- ción de los requerimientos de cemento de los suelos propuestos pa- ra su uso y a determinar qué coeficiente de cemento se debe inves- tigar en las pruebas de laboratorio.

Como regla general se encontrará que el requerimiento de cemento de los suelos aumenta según aumenta el contenido de limo y arcilla, requiriendo los suelos gravosos y arenosos menos ce-- mento para la dureza adecuada, que los suelos de limo y arcilla.

La única excepción a esta regla la constituyen los materia-

les pobremente gradados, arenas de un solo tamaño que estén exentos de limo y arcilla los cuales requieren más cemento que los suelos arenosos que contienen algo de estos componentes.

En general, una mezcla bien gradada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, y arena fina con o sin pequeñas cantidades de limo de poca plasticidad y material de arcilla, requerirá 5% en peso, o menos, de cemento. Los materiales de arena de un solo tamaño, pobremente gradados, con una cantidad muy pequeña de limo no plástico, típicos de las arenas de playas o arenas de desiertos, requerirán alrededor del 9% de cemento, en peso. Los suelos arenosos restantes requerirán generalmente alrededor del 7%. Los suelos limosos no plásticos o moderadamente plásticos requieren generalmente alrededor del 10% de cemento, en peso, y los suelos arcillosos plásticos requieren alrededor del 13% o más.

La Tabla 1-b da los límites de valores más usuales de requerimientos de cemento para suelos subsuperficiales de los diversos grupos de suelos de la AASHO \*. Los suelos de horizonte "A" pueden contener materias orgánicas u otro material perjudicial para la reacción del cemento y pueden requerir coeficientes de cemento más altos. Para la mayoría de los suelos del horizonte A el contenido de cemento señalado en la Tabla 1-b debe aumentarse en cuatro unidades de porcentaje si el suelo es gris oscuro a gris,

---

\* Los gráficos y tablas que se utilizan en la clasificación de suelos por el sistema de clasificación de Suelos de Funcionarios de Carreteras Estadales (Designado por la AASHO: M145-49) se pueden consultar en el apéndice del "Soil-cement laboratory handbook", - págs. 52-60, publicación de la P. C. A.

y seis unidades de porcentaje si el suelo es negro. Usualmente no es necesario aumentar el coeficiente del cemento para un suelo de horizonte A castaño o rojo. El ensayo de suelos superficiales arenosos "de reacción pobre" se analiza detalladamente en el Capítulo 8, (Manual de Laboratorio del Suelo-Cemento). Estos contenidos de cemento pueden usarse como estimaciones preliminares, que son luego verificadas a medida que se dispone de datos adicionales de ensayo.

#### Procedimiento gradual

El siguiente procedimiento proveerá gran ayuda al ingeniero de laboratorio para establecer los contenidos de cemento que han de ser investigados.

Paso 1 : Determinése de la Tabla 1-b el contenido de cemento estimado preliminarmente en peso, basado en el grupo de suelos de la AASHO.

Paso 2 : Usese el contenido de cemento estimado preliminarmente, obtenido en el Paso 1, para llevar a cabo la prueba de humedad-densidad.

Paso 3 : Verifíquese el contenido de cemento estimado preliminarmente refiriéndose a la Tabla 2 si el suelo es arenoso o a la Tabla 3 si es limoso o arcilloso. Estas tablas toman en consideración la densidad máxima y otras propiedades del suelo, las cuales permiten una estimación más exacta.

TABLA 1b Requerimientos de Cemento de los Grupos  
de Suelos según la AASHO

Grupo de suelos según la AASHO	Margen usual en el requerimiento de ce- mento		Contenido estimado de cemento usado en la prueba de humedad-den- sidad <u>% en peso.</u>	Contenidos de cemento para las pruebas de <u>seco-mojado y</u> <u>de congelacion-deshielo</u> <u>% en peso</u>
	% en volumen	% en peso		
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	11-13-15

En el caso de suelos de horizonte A, el coeficiente de cemento indicado debe ser aumentado en la forma analizada anteriormente cuando se discutió el uso de la Tabla 1-b, para suelos del horizonte "A".

Suelos arenosos :

- (1) Usando el porcentaje de material de tamaño inferior a 0,05 mm. el porcentaje de material retenido en el tamiz N° 4, y la densidad máxima obtenida a través de ensayo, en el Paso 2, se determina mediante la Tabla 2 el contenido de cemento estimado.
- (2) Moldéense las muestras para la prueba de seco-mojado y de congelación-deshielo al contenido estimado de cemento en peso determinado en (1) y a contenidos de cemento dos unidades de porcentaje por encima y por debajo de ese coeficiente de cemento.

Suelos limosos y arcillosos :

- (1) Usando el porcentaje de material entre 0,05 mm. y 0,005 mm., el índice del grupo de la AASHO, y la densidad máxima obtenida por ensayo en el Paso 2, se determina en la Tabla 3 el contenido estimado de cemento.
- (2) Moldéense las muestras de la prueba de seco-mojado y de congelación-deshielo al contenido estimado de cemento de terminado en (1) y a contenidos de cemento dos unidades de porcentaje por encima y por debajo de ese coeficiente de -

*1/2 del contenido  
en peso*



TABLA 2. Requerimientos promedio de Cemento de los horizontes B y C de Suelos Arenosos

Material retenido en el tamiz N° 4 %	Material menor de 0,05 mm. %	Contenido de cemento % en peso					
		Densidad máxima, libras por pie cúbico					
		105-109	110-114	115-119	120-124	125-129	130 o más
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

cemento.

Para ayudar a determinar cuán buena es la reacción del suelo, es provechoso ahorrar la mitad de la última muestra de la prueba humedad-densidad y colocarla en una atmósfera de alta humedad y efectuar una inspección diaria. Esta mitad de muestra se obtiene durante el procedimiento usual de cortar verticalmente en la mitad la última muestra de la prueba de humedad-densidad de modo que se pueda tomar una muestra representativa de la humedad. Los criterios usados en el procedimiento rápido de ensayo pueden utilizarse también para apreciar la dureza de esta mitad de muestra, la cual puede generalmente, ser endurecida satisfactoriamente en un lapso de dos a cuatro días, y no es nada raro que esto se logre al cabo de un día de moldeado.

Un estudio de los datos de la resistencia a la compresión, en la forma analizada en el Capítulo 4, (Manual de Laboratorio del Suelo-Cemento) es también útil para la verificación del coeficiente estimado de cemento.

### Suelos misceláneos

Una cantidad de materiales misceláneos o de tipos especiales de suelos, tales como caliche, lidita, cisco, escoria, esquistos, lutita, etc., han sido empleados con éxito en la fabricación del suelo-cemento. En algunos casos estos materiales han sido encontrados cercanos a las carreteras o calles que tenían que ser pavimentadas con suelo-cemento, en otros casos, y a fin de reducir el cos -

**TABLA 3** Requerimientos Promedios de Cemento de los Horizontes B y C  
de Suelos Limosos y Arcillosos

Indice de Grupos de la AASHO	Material entre 0,05 mm. y 0,005 mm. %	Contenido de Cemento - % en peso						
		Densidad máxima, libras por pie <sup>3</sup>						
		90-94	95-99	100-104	105-109	110-114	115-119	120 o más
0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8	7
	40-59	13	12	11	9	9	8	8
	60 o más	—	—	—	—	—	—	—
4-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	20-39	13	12	11	10	9	8	8
	40-59	14	13	12	10	10	9	8
	60 o más	15	14	12	11	10	9	9
8-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	20-39	15	14	11	10	9	9	9
	40-59	16	14	12	11	10	10	9
	60 o más	17	15	13	11	10	10	10
12-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	20-39	16	15	13	12	11	10	10
	40-59	17	16	14	12	12	11	10
	60 o más	18	16	14	13	12	11	11
16-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	20-39	18	17	15	14	13	11	11
	40-59	19	18	15	14	14	12	12
	60 o más	20	19	16	15	14	13	12

**TABLA 4** Requerimientos Promedios de Cemento en  
Materiales Miscelaneos

Tipo del material misceláneo	Contenido de cemento estimado y el usado en la prueba de densidad-humedad		Contenidos de cemento para las pruebas de seco-húmedo y de congelación/deshielo
	% por vol.	% por peso	
Suelos caracoliados	8	7	5-7-9
Residuos de caliza	7	5	3-5-7
Ceniza roja	9	8	6-8-10
Lutita o esquistos disgregados	11	10	8-10-12
Caliche	8	7	5-7-9
Cisco	8	8	6-8-10
Lidita (pedernal)	9	8	6-8-10
Ganga (escoria)	8	7	5-7-9
Marga	11	11	9-11-13
Escoria que contiene material retenido en el tamiz N°4	12	11	9-11-13
Escoria que no contiene material retenido en el tamiz N°4	8	7	5-7-9
Escoria de hierro enfriado por aire	9	7	5-7-9
Escoria de hierro enfriado por agua	10	12	10-12-14

to del proyecto, han sido usados como materiales de préstamo para reemplazar suelos que requerirían un elevado contenido de cemento para un adecuado endurecimiento.

El procedimiento para ensayar materiales misceláneos es el mismo que se utiliza para suelos regulares. Los requerimientos promedio de cemento de algunos materiales misceláneos y el contenido de cemento que han de investigarse en las pruebas de laboratorio se ofrecen en la Tabla 4. A medida que se obtengan los datos de ensayos y se gane experiencia en los materiales misceláneos locales, se encontrará que los futuros ensayos se pueden reducir o eliminar para materiales similares.

Hay un estudio que describe pruebas para determinar si se obtiene un efecto similar con diversas mezclas de suelos y cemento, de tal modo que se pudiera llegar a una reducción en la proporción de cemento usado en la estabilización del suelo mediante la utilización de un cemento de finura mayor que las variedades comerciales empleadas actualmente. Se pueden encontrar más detalles al respecto en el trabajo original "El uso de Cementos de Diferentes Finura en las Mezclas de Suelo-Cemento" por K. E. Clare y D. M. Farrer, Revista de Investigaciones de Concreto: Nov. 1956 (ver en la bibliografía la referencia N° 4).

#### IV. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

##### 1. Generalidades :

### Cómo actúa el cemento en el Suelo-cemento ?

La cementación, hidratación y acción endurecedora del Cemento Portland es similar en el suelo-cemento y en el concreto, para ambos casos se requiere agua. Hay un tiempo inicial y un tiempo final del fraguado del cemento y debe considerarse que la mezcla húmeda de suelo-cemento debe ser compactada hasta la densidad final antes que tenga lugar el fraguado final del cemento. La mayoría de las especificaciones permiten un período de 6 horas para la adición de agua y el compactado final de la mezcla. En general, los ingenieros y contratistas mantienen este período tan corto como sea práctico.

### Cuáles son las funciones del agua en el Suelo-Cemento ?

En una mezcla de suelo-cemento el agua realiza dos funciones. La primera consiste en lubricar la masa para facilitar la compactación. Esto requiere que cada partícula de cemento y cada partícula de suelo esté cubierta de humedad. La segunda función del agua es la de hidratar el cemento.

Se ha demostrado que el contenido óptimo de humedad en la forma determinada en la mezcla de suelo-cemento en el momento en que es compactada mediante el Método de Ensayo de la ASTM, denominada D 558-57, provee una cantidad suficiente de agua para la hidratación del cemento y la cantidad de agua requerida para la compactación más eficiente posible con el equipo de construcción disponible. Cualquier exceso considerable de agua sobre esta can

idad estorbará la compactación, además de que es innecesario para la hidratación del cemento. Como este último proceso debe proseguir en forma ininterrumpida por un período considerable de tiempo, es necesario que la superficie de la mezcla compactada de suelo-cemento sea protegida para evitar la excesiva evaporación del agua durante siete días. La mayoría de las especificaciones requieren un período de siete días de cobertura húmeda.

#### Cómo funciona la compactación en el suelo-cemento ?

El suelo humedecido y las partículas de cemento deben ponerse en estrecho contacto. De este modo, mientras más compactación hay y más fuertemente es apisonada la masa, más eficientemente mantendrá el cemento la cohesión de la masa. Esto puede ser observado en casi todos los proyectos de campo, en los cuales el suelo-cemento suelto y sin compactar tiende a acumularse en las bermas laterales, en contraste con la masa compacta del material de los alrededores de la carretera. Es evidente también que la pulverización del suelo es esencial para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones, que establecen que el material pase 100% el tamiz de 1 pulgada y 80% el tamiz N° 4 (excluyendo la grava y piedras retenidas en estos tamices); y para asegurarse de que el cemento pueda tener oportunidad para actuar sobre el suelo.

Qué cantidad de cemento se utiliza ?

El porcentaje de cemento requerido para producir una mezcla satisfactoria de suelo-cemento varía con las características del suelo utilizado.

Antes que se inicie la construcción, los suelos presentes en el proyecto deben ser identificados y muestras representativas de cada tipo deben ser enviadas al laboratorio para determinar la cantidad de cemento requerida. Los métodos de identificación y clasificación de suelos, así como también los métodos para la realización de estudios de suelos y toma de muestras, se ofrece en: "La Cartilla de Suelos de la PCA" (ver bibliografía, ref. N° 13).

La Tabla 1-b del capítulo anterior da el margen normal de los requerimientos de cemento para suelos de los diferentes grupos según la AASHO. La Tabla 4 da los requerimientos promedio de cemento para una cantidad de materiales misceláneos y de tipos especiales de suelos. Se pueden usar estimaciones preliminares de los requerimientos de cemento para estimar aproximadamente el costo y luego confirmarlo o revisarlo a medida que se va disponiendo de los resultados de las pruebas de laboratorio. En general, mientras más fina es la textura del suelo más cemento se requiere para endurecerlo hasta un grado satisfactorio. Para muchos suelos la cantidad de cemento requerida es de unos 2, 7 sacos por yarda cúbica de la mezcla compactada o 0,45 sacos por yarda cuadrada de una profundidad compactada de seis pulgadas. Como a un saco de ce -

mento se le da una equivalencia del pie cúbico, tal mezcla se considera comúnmente que contiene un 10% de cemento por volumen, En base a esto, se puede decir que los suelos arenosos requieren del 7 al 12% de cemento en volumen y los suelos arcillosos y arenosos del 12 al 16% en volumen. Algunos suelos de textura muy fina requieren porcentajes mayores de cemento.

Las mezclas de suelo-cemento contienen aproximadamente 90% de suelo, material éste que se consigue generalmente en la superficie del canal o que proviene de una zona de préstamo. Tal circunstancia tiende a colocar a este tipo de construcción en el terreno del bajo costo.

¿Qué cantidad de agua es requerida ? ✓

La cantidad de agua que deberá agregarse depende de la humedad presente en el suelo natural y del contenido óptimo de humedad que debe tener la mezcla de suelo-cemento, lo cual varía con la textura del suelo. El suelo-cemento que ha sido mezclado y que está listo para su compactación debe estar cercano a su contenido óptimo de humedad. El contenido óptimo de humedad se determina mediante ensayo designado por la AASHO: T 134, - - "Método Standard de Ensayo para las Relaciones de Humedad-Densidad de Mezclas de Suelo-Cemento".

El suelo-cemento a la humedad óptima no presenta un aspecto de sobresaturación ni de sequedad, pero contiene humedad suficiente para lograr un moldeado firme cuando se le aprieta en

la mano: el agua no puede exprimirse de la mezcla y aparecerá poca humedad en la mano. Con algo de experiencia puede determinarse por medio del tacto la cantidad correcta de humedad dentro de los límites prácticos. Un leve exceso de humedad es mejor que la falta de ella. Desde un punto de vista práctico debe mantenerse el más alto contenido de humedad que permita la colocación y el acabado sin necesidad de retocar la superficie y de "verificar desplazamientos", surcamientos o deslizamientos durante las operaciones de compactación y acabado.

*20 litros  
m<sup>2</sup> x 15 cm de espesor*

Las mezclas arenosas de suelo-cemento requieren aproximadamente 5 galones de agua por yarda cuadrada para un compactado de 6" de grosor. Las mezclas limosas y arcillosas de suelo-cemento requieren alrededor de 7 pulgadas por yarda cuadrada. Las pérdidas por evaporación pueden alcanzar a 2 o más galones por yarda cuadrada.

Cuál es la densidad requerida para la fabricación del suelo-cemento?

En general puede afirmarse que la resistencia y la capacidad de cualquier material estructural determinado para soportar los efectos nocivos de los elementos climáticos varían con su densidad. Esta afirmación es también válida para el suelo-cemento, por esta razón la densidad conveniente en cualquier mezcla determinada de suelo y cemento, debe ser la más alta que pueda alcanzarse prácticamente.

La mayor densidad obtenida a través de la Prueba Standard de la ASTM, D 558-57, o la prueba Standard de la AASHO, T 134-57, mencionada anteriormente (denominada "densidad máxima") es la máxima que puede alcanzarse actualmente en la práctica general y es la densidad que se especifica para la construcción. La fuerza compactadora usada en esta prueba, que utiliza una apisonadora de 5,5 libras desde una altura de caída de 12", es comparable a la obtenida con rodillos de pata de cabra con planchas apisonadoras que varían desde unas cinco a siete pulgadas cuadradas y que poseen presiones unitarias en las patas apisonadoras desde unas 150 a 500 libras por pulgada cuadrada, y apisonadoras de ruedas de acero que varían de tres a quince toneladas, con presiones unitarias de 350 a 500 libras por pulgada de ancho de la llanta.

Las densidades requeridas varían desde unas 135 libras por pie cúbico, peso seco en estufa, para suelos arenosos y de grava bien gradados, hasta 90 libras por pie cúbico, peso seco en estufa, para suelos limosos y arcillosos. Las densidades obtenidas en la construcción no deben ser menores de 5 libras por debajo de la "densidad máxima". LAS DENSIDADES MAXIMAS SON LAS MAS BENEFICIOSAS.

## 2. Construcción con Suelo-Cemento :

Un contenido de cemento apropiado es el primer requisito para la construcción con suelo-cemento. En las discusiones siguientes se asume que los coeficientes de ce

mento y los límites de las áreas de los diferentes suelos - han sido determinados en la zona que se ha de construir.

La preparación del suelo-cemento consiste en mezclar completamente suelo pulverizado y cemento en proporciones correc-tas, con la suficiente humedad para permitir la máxima compac-tación. Los métodos de fabricación son sencillos y se ajustan a un procedimiento definido :

A. Preparación inicial del material :

1. Antes de iniciar el procedimiento, debe completarse - cualquier conformación o nivelación requerida. Durante la conformación y nivelación debe eliminarse toda clase de material de desecho y corregir todas las áreas de subrasante suave. Las áreas suaves pueden descubrirse mediante la observación de la estabilidad de un área a medida que pasa sobre ella cualquier clase de equipo de nivelación desplazable. A menudo se pueden corregir las áreas de subrasante suave mezclando el material en una pequeña cantidad de cemento y volviendo a compactar en seguida la mezcla. Las áreas que no estén demasiado mojadas pueden mejorarse mediante el secado y recompactado del suelo.
2. Se revisa todo el equipo para evitar demoras onerosas. El equipo debe estar en buenas condiciones para cum -

plir con las necesidades de las labores.

3. Deben adoptarse todas las medidas que permitan el acarreo y la manipulación eficiente del agua y del cemento. El número de vehículos de carga que se necesite dependerá de la distancia de acarreo, condición de los caminos de transporte y de la tasa de producción esperada.
  
4. El suelo es escarificado, pulverizado y pre-humedecido. Este paso puede no ser necesario. El suelo-cemento se elabora usualmente con suelos que necesitan poca o ninguna escarificación o pulverización. La mayoría de las especificaciones requieren que en el momento de la compactación el suelo debe ser pulverizado lo suficiente para que, excepto para la grava o piedra, el 100% de la mezcla pase el tamiz de 1" y que al menos el 80% pase por el tamiz N° 4. El humedecimiento del suelo antes de esparcir el cemento ayuda a pulverizarlo y escarificarlo. A menudo esta precaución significa un ahorro de tiempo durante la elaboración.

B. Procedimiento :

Los pasos siguientes deben ser continuos y completarse en el mismo día :

1. El cemento portland es esparcido en el área en la cual se va a utilizar. Puede utilizarse el sistema mecánico o manual para el esparcimiento, en el sistema mecánico debe usarse

un esparcidor para manipular el cemento. El cemento a granel puede ser descargado a camiones de volteo desde va gones de ferrocarril o transportes especiales con un sistema de correa o uno de tornillo sin fin. Los camiones de- ben ir cubiertos para evitar la pérdida de cemento. Cada camionada es pesada en una báscula.

Durante la tarea misma, la esparcidora es enganchada al camión de volteo. A medida que avanza el camión el cemento sale de la plataforma inclinada del camión hacia la caja de la esparcidora y luego hacia el suelo. Platos empa rejadores ajustables regulan la cantidad de cemento.

Con el esparcido a mano los sacos deben ser colocados con toda precisión. Las separaciones deben hacerse en for ma de cuadrados de modo que el área sea cubierta unifor memente con el cemento. Un método sencillo para "motear" los sacos consiste en usar una cadena marcada para mos- trar el intervalo correcto entre las hileras. Se procede a abrir los sacos y el cemento es vaciado en camellones uni- formes transversalmente al área en que se está operando. Dos o más pases con una rastra de púas o con una de clavos es- parcirá uniformemente los camellones.

Los suelos que estén demasiado mojados no se mezcla rán fácilmente. Los arenosos pueden mezclarse con el ce mento si el contenido de humedad es un 2% por sobre el óp

timo. Por otro lado, los suelos arcillosos generalmente no se mezclarán fácilmente con el cemento si el contenido de humedad es mayor que el aproximado al óptimo.

2. El suelo y el cemento portland se mezclan en seco. Este paso debe iniciarse al aproximarse la finalización del esparcimiento del cemento. El objeto es simplemente mezclar completamente el cemento con el suelo. No es necesario un mezclado completo y uniforme.
3. Se aplica el agua y se continúa el mezclado. Debe aplicarse bastante agua para llevar la mezcla al contenido óptimo de humedad o ligeramente superior. Se agrega agua por medio de distribuidores a presión en cantidades tan grandes como lo permitan el equipo y el suelo. Cada adición de agua se mezcla con el suelo y el cemento.

Después que ha sido aplicada la última cantidad de agua, el mezclado continúa hasta que toda la mezcla está de color uniforme y libre de vetas de seco y mojado.

La mayoría de las máquinas móviles combinan en una sola operación el mezclado en seco, la aplicación del agua y el mezclado en mojado. Algunas también pulverizan el suelo al mismo tiempo.

4. La mezcla es compactada a la densidad máxima. Para mejores resultados, la compactación debe comenzar inmedia-

tamente después que se ha dado término al mezclado. Se perderá menos agua y las densidades se obtendrán con más facilidad. El agua perdida por evaporación durante la compactación debe ser reemplazada mediante ligeras aplicaciones. La mayoría de las especificaciones estipulan que el suelo-cemento debe ser compactado hasta dentro de 5 libras (algunos dicen hasta por lo menos el 95%) de la densidad máxima.

Se emplean muchos tipos de equipos para compactar el suelo-cemento. Los más comunes son los rodillos apisonadores, de llantas de caucho y de ruedas de acero. Entre los tipos más recientes de equipo de compactación están los rodillos de tipo rejilla, de ruedas de acero asegmentadas, los vibratorios de ruedas de acero, las compactadoras vibratorias de plato, los rodillos pesados de llantas de caucho, los vibratorios de llantas de caucho. El suelo-cemento preparado con suelos granulares no plásticos puede ser compactado con vibradores de platos, rodillos de rejilla, y rodillos asegmentados.

Los rodillos apisonadores se utilizan para compactar todos los suelos, excepto los más granulares. Se producirán presiones unitarias más altas si el rodillo acarrea cascajos. La mejor norma consiste en emplear el rodillo más pesado que no produzca sobreesfuerzo del suelo y que, incluso, no lo "saque" en un número razonable de pases. La

mezcla debe ser lo bastante floja para permitir a las patas del rodillo que penetren hasta el fondo y que "compacten - por completo" gradualmente.

Los rodillos de llantas de caucho se usan para compactar suelos muy arenosos con muy poco o ningún material aglutinante. El mismo tipo de rodillo puede emplearse también para compactar arena y grava de baja plasticidad. Estos rodillos son cargados e impulsados mediante un tractor tipo oruga de cadenas lisas. Las arenas sin cohesión pueden ser compactadas por el solo peso y vibración del tractor.

Los rodillos pesados de tres ruedas de acero se utilizan en algunas áreas para compactar suelos que contienen poco o ningún material aglutinante. Estos rodillos son de la mayor conveniencia para suelos gravosos de baja plasticidad y que contengan hasta un 20% de material que pase por el tamiz N° 200.

5. La base es terminada conformando con una moto-niveladora y planchando la superficie con apisonadora. Cuando está -- más o menos completa la compactación, se utiliza una moto-niveladora para emparejar el camino. Las manchas lisas - dejadas por el equipo de compactación deben ser eliminadas completamente, lo cual puede hacerse con una escardadora, una rastra de clavos o una de dientes de escarpia. La super

ficie debe conservarse completamente mojada.

Hay numerosos métodos aceptables para el acabado del suelo-cemento. El procedimiento exacto dependerá del equipo, las condiciones de las labores y del tipo de suelo. Independientemente del método, la meta es la misma: una base densa, adecuadamente compactada, libre de planos de compactación, grietas y lomos.

Los rodillos de ruedas de acero se utilizan para alisar los lomos dejados por el compactado inicial con apisonadora. También dan buen resultado cuando se presentan rocas. A veces es útil una escoba de arrastre para eliminar el material aglutinante o de cementación en y alrededor de las piezas de grava que han sido "colocadas" por el rodillo.

Cuando no se emplea un rodillo de ruedas de acero, una práctica común consiste en "raspar" la superficie con la niveladora y luego volver a aplanar con un rodillo de llantas de caucho para sellar la superficie. El "raspado" significa el corte ligero o el recorte de algunos lomos pequeños dejados por el equipo de acabado. Se corta sólo alrededor de 1/8 de pulgada. Se usan suaves aplicaciones de agua para mantener mojada la superficie.

6. Se aplica un material curador a la base del suelo-cemento.

El suelo-cemento acabado contiene humedad suficiente para

la adecuada hidratación del cemento. Se coloca inmediatamente una capa protectora sobre la base terminada a fin de retener esta humedad. La mayoría del suelo-cemento es curado con un material bituminoso, pero otros materiales son totalmente satisfactorios tales como papel impermeable o paja mojada.

Los materiales bituminosos más comúnmente usados son el Rc-2, el MC-3, el RT-5 y las emulsiones asfálticas. La proporción de aplicación varía de 0,15 a 0,30 de galón por yarda cuadrada. Cuando se aplica el curado la superficie del suelo-cemento debe estar libre de todo material seco, suelto y extraño. La superficie del suelo-cemento debe estar completamente húmeda. En la mayoría de los casos el agua se aplica exactamente antes del curado.

Inmediatamente a su conclusión la base se contrae y se forman grietas transversales de contracción. Esta es una característica natural del suelo-cemento y no afecta al buen desempeño de la base. Al contrario, el agrietamiento indica que la hidratación del cemento está produciendo un material endurecido. La mayoría de las grietas aparecen durante los primeros días, aunque pueden aparecer posteriormente.

7. Se coloca una superficie bituminosa sobre el suelo-cemento. Debe proporcionarse una protección apropiada contra la evaporación para el suelo-cemento terminado durante un período

do de hidratación de 7 días. Para este propósito puede em  
plearse paja o tierra mojada o material bituminoso.

La experiencia local y la práctica dictarán los deta -  
lles específicos de la construcción. Las buenas prácticas  
de construcción, p. ej. : el limpiado a fondo de la superfi -  
cie que queda a la intemperie, siempre deben ser observa -  
das cuando se coloca el revestimiento.

### Grosor del suelo-cemento

La mayoría de los pisos de pavimento de suelo-ce--  
mento son construidos de un grosor de 6 pulgadas, pero -  
pueden reducirse a 5 pulgadas, si la subrasante es muy es  
table. Para acequias pequeñas, un grosor de 4 pulgadas -  
puede ser adecuado.

### 3. Equipo utilizado en la construcción con Suelo-cemento

El suelo-cemento y el agua pueden mezclarse mediante  
el uso de diferentes tipos de equipo :

#### A. Máquinas mezcladoras móviles

1. Tipo camellón
2. Mezcladoras rotatorias de pases múltiples

#### B. Plantas mezcladoras fijas

1. Tipo dosificadora
2. Tipo flujo continuo

Se emplean además los siguientes tipos de equipos de compactación :

1. Rodillos de pata de cabra
2. Rodillos de llantas neumáticas
3. Rodillos de ruedas lisas

Otros equipos :

Motoniveladoras con aditamento de escarificación

Distribuidores de agua a presión

Tanques alimentadores auxiliares de agua

Rastras de púas

Escardillos de control hidráulico

Escoba de arrastre

Camiones para acarreo del cemento

Esparcidoras del cemento

Equipo de carga y de dosificación de cemento a granel

En cualquier tipo de equipo de mezclado que se use, los principios generales y los objetivos son los mismos. Durante la construcción, pueden hacerse dos o más operaciones progresivas al mismo tiempo. Algunas máquinas mezcladoras móviles, p. ej., combinan dos o más de las operaciones de construcción. Es común hoy el uso de máquinas mezcladoras móviles y de grandes mezcladoras rotativas. Estas máquinas incorporan el cemento portland y el agua con el suelo para la profundidad total del tratamiento, ya sea por pases sencillos o múltiples. Ocasionalmente

se utilizan equipos tales como : cultivadoras para tareas pesadas, rastras de discos y arados múltiples. Para algunas condiciones - p. ej., en proyectos que comprenden suelos de préstamo, puede ser ventajosa la instalación de una planta fija que utilice una mezcladora tipo amasadora. Una instalación fija emplea una planta mezcladora central ubicada cerca del proyecto, siendo transportada la mezcla de suelo-cemento desde la mezcladora al sitio de la pavimentación. Las mezcladoras mecánicas modernas son muy eficientes y dan producciones diarias elevadas con un bajo costo de construcción.

Independientemente del método de mezcla usado, la compactación de la mezcla del suelo-cemento se lleva a cabo con rodillos de pata de cabra, de llantas de caucho o de ruedas de acero, según sea el tipo de suelo y las condiciones de las labores.

Los suelos con un contenido aproximado del 50% de limo y arcilla combinados requerirán usualmente una mezcladora tipo amasadora para producir eficientemente el suelo-cemento plástico. Para suelos con cantidades menores de limo y arcilla puede utilizarse una mezcladora tipo mortero. Los suelos de grano muy -- grueso pueden ser mezclados satisfactoriamente en una mezcladora de concreto.

Se han aplicado numerosos métodos para revestir canales de riego con suelo-cemento plástico usando una mezcladora de tipo móvil. En una sola operación el cemento es vaciado en un camellón de suelo situado en la margen del canal. Una máquina - -

mezcladora recoge el suelo y el cemento, los mezcla e incorpora la cantidad de agua requerida. La mezcla plástica es depositada luego en un encofrado móvil estacionado en el canal. Tanto la -- mezcladora como el encofrado móvil avanzan simultáneamente de jando un revestido de canal del grosor deseado.

En otro proyecto que requería el revestimiento de una acequia de drenaje para prevenir la erosión adicional del suelo arenoso, se utilizó un método diferente de construcción. La primera zanja fue excavada hasta la subrasante con un "buldozer". Se colocó una mezcladora de concreto de dos sacos en el fondo de la zanja y se le hizo avanzar mediante un tractor de tipo oruga. El suelo excavado por el buldozer fue empleado para la mezcla de - suelo-cemento. Después de mezclado, se coloca el suelo-cemento plástico y se concluye el acabado a mano con cepillos de madera y trozos de madera lisa.

Debe aplicarse una cubierta al suelo-cemento ya acabado, - para evitar la evaporación de la humedad y permitir la adecuada hidratación del cemento. Generalmente se usa una membrana bi tuminosa para el curado, aunque puede emplearse suelo mojado.

Estos son dos de los numerosos y diferentes métodos que - han sido usados en la construcción de revestimientos y encofra - dos con suelo-cemento plástico. En todos los métodos de cons - trucción propuestos debe considerarse el hecho de que las mez - clas de suelo-cemento se endurecen rápidamente en seguida de su colocación. Por tal razón la mezcladora debe ser colocada

lo más cerca del sitio de pavimentación como sea práctico. ✓

4. Factores Especiales en la construcción - El tiempo atmosférico

El tiempo húmedo puede constituir un peligro para la construcción. Aunque durante los meses de verano normales no hay mucho peligro, para la construcción, deben adoptarse ciertas precauciones ordinarias. Por ejemplo, cualquier cantidad de tierra suelta o pulverizada debe ser gradada cuidadosamente de modo que deje escurrir el agua, y los sitios bajos en la pendiente donde puede acumularse el agua deben ser acondicionados para que drenen libremente. El poner atención a unas pocas y simples precauciones como éstas reducen grandemente la posibilidad de un daño grave.

Las lluvias. El ingeniero y el contratista sin experiencia en la materia pueden pensar que la lluvia es un riesgo de mucha gravedad en la construcción; pero, como se ha demostrado por la construcción de millones de yardas cuadradas de suelo-cemento en todos los climas; es improbable que la precipitación pluvial durante la construcción real sea un problema para el ingeniero experimentado. Habitualmente la construcción requiere la adición de agua equivalente a 1 hasta 1-1/2 pulgadas de lluvia.

Una llovizna ligera no causa ningún daño. Si la lluvia cae durante las operaciones de esparcimiento del cemento, se suspende dicha tarea y el cemento ya esparcido se mezcla rápidamente en la masa del suelo. Una precipitación pluvial intensa que se -

produzca después que ha sido agregada la mayor parte del agua puede ser grave. Generalmente el mejor procedimiento consiste en obtener una rápida compactación utilizando todas las partes del equipo de modo que la sección sea vaciada y conformada antes que se produzcan demasiados perjuicios como consecuencia de la lluvia. En tales casos puede ser necesario completar posteriormente el nivelado y acabado final; luego se procede a eliminar todo material sobrante de la superficie. Después que la mezcla ha sido vaciada y acabada, la lluvia no ocasionará ningún daño.

Suelo Mojado. El suelo excesivamente mojado es difícil de mezclar y pulverizar. La experiencia ha mostrado que el cemento puede ser mezclado con suelos arenosos cuando el contenido de humedad llega a dos puntos del porcentaje por sobre lo óptimo. Para suelos arcillosos el contenido de humedad debe estar por lo menos tres puntos de porcentaje bajo el óptimo para un mezclado eficiente. Sólo raramente es necesario secar completamente un suelo mediante aireación, pero si así se requiere esto se puede obtener eficientemente mediante el empleo de cultivadoras de campo para labores pesadas y mezcladoras giratorias operadas con el capó abierto.

El mantenimiento de una buena pendiente trasversal de la superficie superficial para permitir el rápido escurrimiento del agua superficial antes de la elaboración del suelo-cemento es el mejor seguro contra las excesivas cantidades de suelo mojado.

Subrasante suave. La apropiada compactación es uno de los requerimientos fundamentales de la construcción del suelo-cemento. Si la subrasante es suave y no puede resistir adecuadamente el equipo de compactación, no se obtendrá una compactación apropiada. Por lo tanto, las áreas suaves deben ser localizadas y corregidas antes que em-piece la elaboración.

Las áreas de subrasante lisa y blanda, se deben habitualmente al deficiente mantenimiento de la rasante previo a la elaboración del -suelo-cemento. Tales áreas pueden ser estabilizadas generalmente -mediante la aireación y recompactación del suelo. Las áreas de sub-rasantes extremas, profundas y flojas pueden ser "subprocesadas" con el suelo-cemento. En el subprocesamiento, la capa superior del sue-lo es volteada hacia los lados y la capa del fondo es mezclada con el cemento y se procede a compactarla. La acción de secado del cemen-to y su hidratación por dos o tres días endurecerá suficientemente el -área para que la capa superior del suelo pueda ser recolocada y proce-sada en la forma usual.

Las áreas de filtración deben ser ubicadas y drenadas adecua-damente.

En ciertas ocasiones las subrasantes flojas no se harán paten-tes hasta que la compactación haya sido completada parcialmente. En pequeñas situaciones de peligro indicadas al momento de la compactación por agrietamiento y desplazamiento, los rodillos son removidos y el aplanado final se hace con carretillas vacías o con un rodillo de -

poco peso.

Tiempo frío. El suelo-cemento, al igual que otros productos que usan cemento, se endurece a medida que el cemento se hidrata. Como la hidratación del cemento prácticamente cesa cuando las temperaturas están cerca o bajo el punto de congelación, el suelo-cemento no debe colocarse cuando la temperatura está a  $-40^{\circ}\text{F}$  o por debajo. Más aún, debe ser protegido para prevenir su congelamiento por un período de 7 días después de su colocación, mediante una cubierta conveniente de heno, paja u otro material protector, esto por supuesto es referido a título de información general, ya que muy raras veces ocurre este tipo de construcción en sitios de estas condiciones climáticas.

#### V. INSPECCION Y CONTROL DE CAMPO

El propósito de la inspección y el control de campo es asegurarse la obtención de los resultados establecidos en los planes y especificaciones.

En la construcción del suelo-cemento hay tres factores de control de primera importancia. Ellos son :

1. - Adecuado contenido de cemento
2. - Apropiado contenido de humedad
3. - Compactación apropiada

También debe obtenerse una mezcla a fondo del suelo pulverizado, el cemento y el agua. Para ayudar a alcanzar estos -

objetivos, se da la siguiente lista de puntos a verificar :

1. - Inspección de la rasante y corrección de todas las áreas blandas de la subrasante.
2. - Apropiada identificación de los suelos de modo que pueda agregarse a cada suelo el porcentaje correcto.
3. - Pulverización adecuada.
4. - Cálculo del cemento a esparcir.
5. - Verificación de la cantidad esparcida de cemento
6. - Incorporación de la cantidad correcta de humedad (agua)
7. - Uniformidad de la mezcla; profundidad y ancho del tratamiento.
8. - Grado de compactación - densidad.
9. - Acabado adecuado.
10. - Curado apropiado.

La inspección adecuada es primordialmente un buen juicio basado en la experiencia y los requerimientos de los planes y especificaciones. Muchos renglones son controlados automáticamente según el constructor va aprendiendo procedimientos de construcción apropiados. Los ensayos y cálculos son básicamente los mismos usados para controlar la compactación del terraplén.

\* Inspecciónese el área que se va a pavimentar

Antes de que empiece la construcción, véase que el área a pavimentar esté en rasante y conformada en la forma requerida para la construcción de la base del pavimento hasta las líneas, rasantes y grosor y

sección transversal típica mostrados en los planos. .

Durante la nivelación, deben removerse todos los desechos y materiales de acarreo y corregirse todas las áreas de subrasante blanda. Lo último es importante, puesto que no se puede obtener una adecuada compactación si la subrasante es blanda y esponjosa y no resiste el peso del equipo de compactación y de acabado.

\* Verifíquese el contenido de cemento que se usará

El éxito del suelo-cemento depende del mezclado de la cantidad correcta de cemento portland con el suelo. En la mayoría de las operaciones, los requerimientos de cemento y tipos de suelo son establecidos con bastante anticipación al comienzo de la construcción; sin embargo, éstos deben verificarse haciendo referencia al informe del estudio de suelos, a los informes de la prueba de laboratorio y a los planos y especificaciones.

\* Verifíquese el grado de pulverización del suelo

Las especificaciones exigen generalmente que en el momento de la compactación el 80% de la mezcla pase el tamiz N° 4 y el 100% el tamiz de 1 pulgada, excluyendo algunas gravas o piedras.

Se hace una prueba de pulverización cerniendo una muestra representativa a través de un tamiz N° 4 y calculando el porcentaje que pasa :

$$\% \text{ de pulverización} = \frac{\text{peso seco de la mezcla que pasa por el tamiz N° 4}}{\text{peso seco de la muestra total, con exclusión de la grava retenida en el tamiz N° 4}} \times 100$$

\* Calcúlese la cantidad de cemento que ha de esparcirse por cada yarda cuadrada (o pie lineal) del trabajo a elaborar

El contenido de cemento se da usualmente como un porcentaje del volumen de la mezcla compactada. Para un contenido de cemento especificado del 8% en volumen, el requerimiento de cemento para 1 yarda cuadrada de suelo-cemento de 6" en grosor compactado es de 3 pies x 3 pies x 1/2 pie x 0,08, o 0,36 sacos de cemento (un saco de cemento = 1 pie cúbico). Esto equivaldría a 33,8 libras de cemento por yarda cuadrada (0,36 x 94 libras, el peso de 1 saco cemento)

\* Verifíquese la exactitud del cemento esparcido

Para la masa de cemento esto puede hacerse de tres modos :

1. - Colóquese una lona de 1 yarda cuadrada en el área a pavimentar delante de la esparcidora. Después de pasada la esparcidora levántese la lona y pésese el cemento acumulado en ella.
2. - Verifíquese la distancia o área sobre la cual se esparce una carga conocida de cemento. P. ej., para esparcir 33,8 libras por yarda cuadrada requeridas para un coeficiente de cemento del 8% en volumen en una base de pavimento de 6 pulgadas, una carga de cemento de 7.520 libras debe cubrir  $7.520 / 33,8 = 223$  yardas cuadradas. Para una esparcidora de cemento de 8 pies de ancho esto sería - - -  $223 \div 8/9 = 251$  pies lineales. Sin embargo, si el camión viajó sólo 235 pies, la cantidad de cemento realmente espar

cida sería de :

$$7.520 \div \frac{235 \times 8}{9} = 36 \text{ libras por yarda cuadrada.}$$

Como la cantidad conveniente es 33,8 libras de cemento por yarda cuadrada, la esparcidora debe corregirse para que derrame menos cemento.

3. - La cantidad de cemento a granel esparcido mecánicamente en la cima de un camellón puede comprobarse en la siguiente forma :

- a) Introduzca dos hojas en la cima del camellón con una separación de 1 pie exactamente.
- b) Remueva y pese todo el cemento depositado entre las láminas.
- c) Compare la cantidad que se está esparciendo efectivamente con la cantidad requerida y corrija la esparcidora si es necesario.

Los sacos de ~~cemento~~ esparcidos se verifican comparando el número de sacos realmente colocados por cada estación de 100 pies con el número requerido.

\*Verifíquese el contenido de humedad de la mezcla de suelo-cemento

La prueba de campo de densidad-humedad determina dos factores básicos de control: la humedad óptima y la densidad máxima a que debe compactarse la mezcla. La prueba es un método standard designada por la AASHO: T 134.

Para determinar la cantidad de agua que se agregará, calcúlese primero el porcentaje de agua en una muestra del suelo natural o de la mezcla seca de suelo-cemento, de la siguiente forma :

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{peso mojado} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100$$

La cantidad de agua que ha de agregarse durante la elaboración será la diferencia entre el contenido óptimo de humedad y el contenido de humedad de la mezcla seca de suelo-cemento, en la forma que se determinó anteriormente.

Un ingeniero experimentado puede aprender a juzgar el contenido de humedad de una mezcla de suelo-cemento en forma práctica mediante la prueba de "exprimir la muestra entre los dedos". Esta prueba no debe reemplazar a la del contenido de humedad de campo, pero puede reducir el número de ensayos requeridos durante la construcción.

Durante la compactación y el acabado, la superficie de la base de suelo-cemento puede secarse. Esto lo indicará una ligera coloración grisácea en la superficie. En este caso, deben agregarse pequeñas cantidades de agua con un distribuidor de presión para llevar a la mezcla a la humedad óptima o ligeramente por encima de ésta.

\* Verifíquese la uniformidad del mezclado, y la profundidad y anchura de la preparación

Cávense zanjas o una serie de hoyos a intervalos regulares para la profundidad total de la preparación e inspecciónese el color del material extraído. Si la mezcla tiene un color uniforme, sin vetas, quiere -

decir que se ha obtenido una mezcla satisfactoria.

Al mismo tiempo, verifíquese la profundidad del mezclado. Habitualmente 8 o 9 pulgadas de mezcla floja producirán alrededor de 6 pul gadas de grosor compactado, aunque esto puede variar ligeramente de a cuerdo al tipo de suelo que se está procesando.

\* Verifíquese la densidad y profundidad compactada final

Uno de los factores de control para la calidad del suelo-cemento es la adecuada densidad o compactación. La densidad in situ de las pri meras secciones construidas debe determinarse en numerosos lugares. Las comparaciones de estas densidades con los resultados de la prueba de campo de densidad-humedad indicará cualesquiera correcciones ne - cesarias en los procedimientos de compactación.

La mayoría de las especificaciones requieren que la densidad ob tenida no sea inferior a 5 libras (un 5% más o menos) por debajo de la - densidad determinada a través de la prueba de campo de densidad-hu<sup>me</sup> dad. Después que han sido establecidos los procedimientos de compac - tación sólo se requieren verificaciones diarias de la densidad.

El método del cono de arena (designado por la AASHO: T 147) es uno de los más comunes para determinar la densidad in situ. En el - - mismo momento en que se realiza la prueba de densidad se verifica la profundidad de la preparación.

VI. ALGUNOS TRABAJOS PUBLICADOS SOBRE EL SUELO-CEMENTO

"El revestimiento con suelo-cemento colocado mecánicamente"

por: W. S. Byrne y W. G. Holtz

Una sección de 3/4 de milla del canal de riego del proyecto de Austin W. C., en el S. O. de Oklahoma, fue revestida con suelo-cemento plástico en una operación única y continua de mezclado y colocación utilizando equipo mecanizado. Aunque el trabajo fue de carácter experimental y dirigido ampliamente hacia el desarrollo de los métodos y del equipo, los resultados demuestran que bajo ciertas condiciones una mezcla plástica de suelo-cemento puede ser colocada mecánicamente en los canales rápida y eficientemente. Además, el experimento indica que, con posibles mejoras y adaptaciones en el tipo de equipo empleado, las operaciones en amplia escala de revestido de canales utilizando el suelo-cemento plástico tienen una posibilidad definida.

El experimento, llevado a cabo cerca de la ciudad de Altus, Oklahoma, es parte del extensivo programa de revestimiento de canales a más bajo costo elaborado por el Bureau of Reclamation, cuyo objetivo es la reducción de los costos del revestimiento por medio de métodos y materiales mejorados. A pesar de las excesivas pérdidas por infiltración de agua muchas millas de canales de riego en el Oeste de los EE. UU. están actualmente sin revestimiento a causa del alto costo de tales instalaciones (ENR, Febr. 6, 1947, vol. p. 192). El proyecto Austin W. C. de 60.000 acres, que tie

ne más de 300 millas de canales y laterales, fue el sitio elegido para el primer experimento en el programa total.

Este experimento previo, dirigido más específicamente a determinar la conveniencia del suelo-cemento como material para el revestimiento de canales (ENR, Marzo 21, 1946, vol. p. 410), fue preliminar al trabajo recientemente terminado. La instalación hecha en esa oca-sión, hace poco más de 2 años, consistió en dos secciones cortas de revestimiento de diferentes tipos. Uno de éstos fue colocado usando mezclas relativamente secas de suelo-cemento compactado mediante rodi-llos operando hacia arriba y hacia abajo de los taludes del canal. La otra sección fue revestida con una mezcla plástica de suelo, cemento y agua, colocada manualmente, habiéndose llevado a cabo el mezclado con una mezcladora de concreto. Se llegó a la conclusión de que el reemplazo del último procedimiento por métodos rápidos, más económi-cos y mecanizados era el siguiente y lógico paso en el desarrollo de las operaciones de revestimiento de suelo-cemento plástico para cana-les.

#### Nuevos métodos de trabajo rápido

Para el experimento de revestimiento de canales, recientemen-te terminado, se escogió una sección de 4.000 pies en una parte del sistema de distribución del proyecto designado como el Lateral Oeste 11,5. Esta sección es de suelo permeable y arenoso donde la ausencia de un revestimiento originaría una excesiva pérdida de agua y erosión de las márgenes. Las dimensiones y capacidad de la sección lateral revestida

figuran en la tabla siguiente :

<u>DATOS DE LA SECCION LATERAL REVESTIDA</u>	
Ancho del fondo	4,0 pies
Pendientes laterales	1 a 1-1/2
Profundidad del agua	2,0 pies
Area de la sección	14,0 pies cuadrados
Capacidad	44,5 pies <sup>3</sup> /seg.
Altura del revestido (vertical)	3,0 pies
Grosor del revestimiento	3,0 pies

Para mezclar y colocar el suelo-cemento, la operación requiere dos máquinas, cuyos nombres patentados son: "Pavimentadora de Canales Ekenstam", y una planta mezcladora móvil tipo amasadora "Baber-Greene Modelo 848". El modelo o encofrado deslizante fue llevado a lo largo del canal primero mediante cables de guaya y luego por tractores. El suelo y el cemento fueron colocados formando camellones sobre la berma del canal y sacados mediante la planta móvil a medida que ésta avanzaba a lo largo del canal. Una correa sin fin de descarga transportaba la mezcla desde la planta a la tolva del molde deslizante. El agua para el mezclado, para mojar el camellón y la subrasante, y para otros propósitos, fue llevada al sitio en camiones.

El suelo-cemento fue colocado en una proporción máxima de 351 pies lineales por hora, y la mejor tarea continua fue de 1.375 pies lineales, o sea 2.292 yardas cuadradas, en 4 horas 40 minutos. Con ciertas mejoras en la instalación experimental, se pensó que el equipo podría -

colocar más de 3.000 yardas cuadradas de revestimiento de 3 pulgadas por día. El total de los costos unitarios, excluyendo el cemento, tomado sobre un período de cuatro días en el que se colocó alrededor de 5.800 yardas cuadradas de revestimiento, dio un promedio de Dls. 0,52 por yarda cuadrada. El experimento indicó que este costo puede ser reducido substancialmente en operaciones de mayor envergadura.

#### Determinación de las mezclas de suelo-cemento

Las mezclas de suelo-cemento plástico son objeto de las mismas pruebas de laboratorio que las de suelo-cemento standard, y los criterios establecidos por la Asociación de Cemento Portland para la elaboración de suelo-cemento de dureza, durabilidad y utilidad satisfactorias fueron utilizados en la determinación de la mezcla. El alto contenido de humedad requerido para la plasticidad causó una disminución en la densidad y durabilidad y exigió un aumento del contenido de cemento, por encima del requerido para las mezclas standard, para proporcionar una durabilidad equivalente.

El contenido de cemento necesario para estabilizar la mezcla plástica de los suelos provenientes del Lateral Oeste 11,5 fue determinado por pruebas conducidas en el Laboratorio de Denver en cuatro muestras de suelos representativos. Estos suelos, que contenían de 14 a 35% de limo y arcilla, fueron clasificados como arena fina, arena limosa y franco arenoso. Cayeron dentro del grupo de suelos A-2 de la clasificación de la Administración de Caminos Públicos (Public Roads Administration). El método de clasificación de la PRA, que se basa en la capa-

idad de los suelos para soportar cargas sobre ruedas, se fundamenta en realidad en cinco características de los suelos: cohesión, fricción interna, compresibilidad, elasticidad y capilaridad. Aunque el uso del suelo-cemento para el revestimiento de canales es relativamente nuevo y es considerado aún en etapa experimental, se ha llegado a la conclusión que estas características de suelo tienen relación con la durabilidad de las mezclas de suelo-cemento usadas en los revestimientos.

Muestras de seco-mojado y de congelación-deshielo que contenían 6, 10, 12 y 14% de cemento, en volumen, y una muestra para estudiar el cambio de 1 volumen que contenía un 12% de cemento fueron preparadas y estudiadas. El contenido promedio de densidad y humedad de las mezclas plásticas fue de 104,9 libras por pie cúbico y 20,8%, respectivamente.

Sobre la base de estas pruebas y de los criterios establecidos, se concluyó que un 11% de cemento por volumen proporcionaba una satisfactoria mezcla de campo plástica. Las pruebas de permeabilidad hechas en las mezclas plásticas que contenían un 11% de cemento indicaron que la mezcla era impermeable. Como se deseaba una información experimental adicional para las instalaciones de revestido de canales, se recomendó que el lateral Oeste 11,5 fuese construido usando mezclas de un 11,1; 16,7 y 22,2% en volumen. Así, se hizo una comparación de campo con suelo-cemento conteniendo 3; 4,5 y 6 sacos de cemento por yarda cúbica de material de revestimiento.

### Operaciones preliminares

A pesar de su carácter experimental la obra de revestimiento del canal fue llevada a cabo de manera práctica, y con todos los refinamientos empleados susceptibles de aplicarse en la construcción en amplia escala. La excavación gruesa hasta un 0,5 de pie fue removida mediante un "dragline" pequeño luego que habían sido efectuados todos los cortes y rellenos mediante un tractor y una "traílla". El material sobrante proveniente de la excavación fue amontado en el costado derecho de la zanja, y parte de él fue dispuesto en un camellón hasta la cantidad correcta para uso en el revestimiento con suelo-cemento.

El revestimiento del canal de las dimensiones especificadas requirió 3,84 pies cúbicos de mezcla de suelo-cemento por pie lineal. A fin de asegurar un amplio suministro de material para las irregularidades de la subrasante todos los cálculos fueron basados en requerimientos de 4,0 pies cúbicos.

Para determinar las dimensiones exactas del material que debía disponerse en camellones sobre la margen lateral, se hizo un recorrido de prueba para una distancia de cerca de 300 pies. Se conformó un camellón por medio de un patrol, se removió el material contenido en 1 pie lineal, y se determinó el porcentaje de humedad y el peso seco del suelo por pie cúbico. De este modo se estableció una densidad promedio de 18 libras por pie cúbico, así como también un área promedio de 5 pies cuadrados para el camellón. El cemento requerido para cada pie lineal se calculó sobre la base de estas cifras. Durante la conformación final se vació el cemento de los sacos a una depresión formada

en el medio del camellón.

Se hicieron numerosos recorridos de prueba sin cemento para de terminar las aberturas necesarias de la compuerta entre la tolva de almacenamiento y el amasadero de la mezcladora, con la planta movilizándose a 3, 5 y 10 pies lineales por minuto. Aunque estos experimentos probaron ser valiosos para establecer el procedimiento para mezclar el suelo-cemento plástico durante las operaciones del revestimiento, se pudo apreciar fácilmente que era necesaria la operación flexible de la mezcladora móvil, en la medida en que la abertura en el amasadero tenía -- que hacerse variar de acuerdo con el contenido de humedad del camellón, la uniformidad del avance y las irregularidades de la subrasante.

El contenido de humedad conveniente para la mezcla plástica de campo alcanzó un promedio de alrededor del 30%. El agua fue suministrada por tres camiones cisterna de 700 galones de capacidad que la traían de un abastecimiento situado a 2 millas de distancia.

#### Diseño de la Pavimentadora de Canales

Para la colocación del revestido de canales, el diseño de la "pavimentadora Ekenstam" se basa en el principio de un molde deslizante controlado por medio de un artefacto deslizable tipo trineo que se ajusta a la forma de la zanja y es impulsada a lo largo del fondo de la misma por un cable tipo guaya. En la forma que fue construida originalmente la máquina tenía 18 pies de longitud y consistía en un malacate ("winche") movido a gasolina y montado en una especie de carreta seguido de una

tolva a todo lo ancho, dividida en compartimientos mediante aletas diagonales y equipada (en el fondo de la pared posterior) con listones guías central y laterales para nivelar el revestido. Atado a la parte posterior del artefacto deslizante había tres espátulas o cepillos de albañil de acero diseñados para darle un acabado final a la superficie del revestido. Tanto el artefacto deslizante como las espátulas podrían ser ajustadas por medio de tensores para producir el grosor correcto del revestido. La máquina mostró versatilidad a pesar de su tamaño y peso, pero hubo que hacerle una revisión considerable antes de que pudiera ser adaptada para - colocar el revestido de suelo-cemento.

Se dispuso de muy poco tiempo para la experimentación preliminar con la máquina pavimentadora. Fue necesario proceder al revestido inmediatamente después de la llegada de la pavimentadora. Los primeros intentos de operación tuvieron un resultado negativo. En estas pruebas preliminares se hizo evidente que la distribución uniforme del suelo-cemento al artefacto deslizante era de primordial importancia. Se construyeron e instalaron, con muy poco éxito, numerosos tipos de tolvas.

Después de tres días la pavimentadora fue desmantelada y vuelta a construir bajo la dirección del inventor. Su longitud total fue reducida a 15 pies, fueron removidas las partes de las aletas diagonales de la tolva y las espátulas de acero fueron reducidas a la mitad. La tolva fue -- provista de una plancha distribuidora en el centro de modo que la mezcla de suelo-cemento pudiera ser colocada en el lugar, sobre las pendientes laterales, por obreros provistos de azadas de albañil. La pavimentadora remodelada fue puesta en operación de nuevo y en 4 días se completaron

los 3.500 pies de pavimento restantes.

### Resultados prácticos de la operación

Las operaciones durante estos cuatro días fueron excepcionalmente suaves, considerando el limitado tiempo permitido para experimentar con las dos máquinas. No se experimentó ninguna dificultad en la coordinación del movimiento de avance de la planta móvil con el de la pavimentadora, aunque se descubrió que una velocidad constante de avance era particularmente esencial para una buena operación de la pavimentadora.

En general, el revestimiento así colocado fue de buena calidad y apariencia. Algunas oquedades e irregularidades quedaron en la superficie, debido principalmente a la falta de una adecuada tolva alimentadora en la pavimentadora y a la ineficiencia de la distribución de la mezcla -- mediante la labor manual. Las demoras ocasionadas por paralizaciones de la máquina o del suministro de agua y cemento fueron pocas, pero -- cuando se produjeron, la mezcla del suelo-cemento en la pavimentadora se endureció y costó bastante sacarla. Las mejoras sugeridas en el molde deslizante incluyen una provisión para sacar verticalmente la máquina de la zanja, para proceder a su limpieza, y también algunos medios -- para hacer las uniones adecuadas entre los tramos elaborados diariamente. La vibración externa en las espátulas de la estructura deslizante y las facilidades mecánicas para la distribución de la mezcla en la pavimentadora serían otras lógicas mejoras.

### Curado del revestimiento de suelo-cemento

Fueron ensayados numerosos tipos de curado para determinar el método más eficiente. Una cobertura de suelo húmedo de más o menos 1 pulgada de espesor demostró ser lo más eficaz y dió los mejores resultados inmediatos. Un compuesto para el curado, pigmentado de blanco, aplicado por medio de una pistola rociadora, proporcionó una buena cubierta con costo barato de aplicación. Otras preparaciones usadas incluyeron una mezcla del 30% de parafina con el 70% de "fuel oil" (combustible Diesel) aplicada a 120°F y un recubrimiento de aceite RC-2 aplicado en caliente.

Se observó algo de agrietamiento a poco de ser colocado el revestido, particularmente en las secciones de revestido curado por la mezcla de parafina y aceite y recubrimientos de aceite RC-2. En general, la mayoría fueron grietas superficiales y formaron un patrón que pareció indicar que al menos en parte se debieron a la fricción entre las láminas de alisado y la superficie acabada del revestimiento. A medida que aumentaba el contenido de cemento de la mezcla y se hacía más pegajosa la consistencia, pareció aumentar el agrietamiento. En vez de una cubierta de tierra húmeda, se pensó que el compuesto de curado pigmentado de blanco, colocado inmediatamente tras la pavimentadora, daría buenos resultados en la prevención de grietas producidas por la elevada temperatura de la superficie.

Los méritos por la feliz culminación del experimento corresponden a las numerosas personas y firmas que aportaron una ayuda valiosa en

la planeación y ejecución del trabajo, incluyendo a Joe Casey y Ed Ekens tam, de las Obras de Hierro Madson; M. D. Catton, gerente del Departamento de Suelo-Cemento y V. O. Peterson, ingeniero de la Asociación de Cemento Portland; M. C. Miller, de la Compañía de Construcciones San - Ore; y Ashley Barber, vice-presidente de la Compañía Barber - Cyreene.

Las operaciones del Proyecto W. C. Austin están bajo la dirección general de Michael W. Straus, comisionado del Bureau of Reclamation. - El proyecto está ubicado en la Región 5, cuyo director general ejecutivo - es Howard E. Robbins. Toda la construcción está bajo la supervisión téc nica de Walker R. Young, ingeniero jefe, en Denver.

### "El suelo-cemento para la Estabilización de Canales"

Evaluación de revestimiento de suelo-cemento  
compactado y plástico

por: Earl G. Johnson

Los revestimientos de suelo-cemento, tanto compactado como -- plástico, han demostrado ser materiales efectivos y económicos para la estabilización de canales en las actividades navales. Los canales de suelo-cemento compactado están en condiciones sorprendentemente buenas - después de cuatro años de uso en la Planta Industrial de Reserva de Ar - mas Navales de los EE. UU., Calverton, Long Island, Nueva York. Los canales de suelo-cemento plástico han mostrado muy poco o ningún deterio ro a los ocho años de su colocación en la Estación Aérea Auxiliar de la Ma rina de los EE. UU., Whiting Field, Milton, Florida. Estas dos instalaciones

nes de revestimientos de suelo-cemento en canales se describen brevemente en este estudio y se evalúa su efectividad.

### Canales de suelo-cemento compactado

#### El Problema

En la planta de reserva industrial de armamento de la Marina, arrendada a la Corporación Grumman de Ingeniería Aeronáutica, el problema consistía en tomar el escurrimiento excesivo proveniente de las superficies pavimentadas, descargarlo a través de canales a velocidades relativamente altas o canales de superficie seca, ácida y arenosa. Fue necesario dispersar el flujo en este punto de modo que pudiese penetrar con seguridad a áreas más bajas situadas en sitios boscosos. Las velocidades altas resultantes en las canaletas de salida ocasionaron un grave socavamiento de las estructuras de salida. Las medidas de reforestación no habían conseguido dar una protección adecuada. Se decidió utilizar suelo-cemento compactado debido a que los canales anchos y los suelos arenosos en el lugar proporcionaban las condiciones ideales para este método.

#### Proyectos y especificaciones

La obra fue hecha por contrato. Los proyectos y especificaciones finales, así como la ejecución del contrato estuvieron a cargo de la Corporación Grumman de Ingeniería Aeronáutica. Un informe preliminar de ingeniería proporcionado por la Oficina de Obras Públicas de Area, Nueva York, estableció previamente el método general de control. El ingeniero de conservación del estado de Nueva York Servicio de Conservación de -

Suelos del Departamento de Agricultura de los EE. U. U. asesoró la preparación de este informe.

Las especificaciones exigieron 0,65 sacos de cemento portland -- por yarda cuadrada de canal, para ser mezclados a fondo con las seis pulgadas de suelo superficial existente. Esto es aproximadamente el 14,5% de cemento. La arena existente en las cercanías de Calverton, tenía algo de contaminación orgánica y era de textura abierta sin ningún aglutinante. Esto tiene que ver con el elevado porcentaje de cemento. El método de instalación se ciñó a las recomendaciones del manual de suelo-cemento - de la Asociación de Cemento Portland.

### Construcción

Los pasos seguidos en la construcción por el contratista fueron :

Nivelación rústica y conformación de canales con el equipo nivelador.

Colocación y esparcimiento del cemento. Esto se hizo manualmente porque la magnitud de la tarea no requería un equipo especial.

Mezclado en seco del cemento y el suelo con una mezcladora de -- polvo "Seaman".

Aplicación del agua desde un camión cisterna y continuación del mezclado del suelo.

Aplanado y compactación del canal principal con un rodillo de llantas neumáticas. (Para esta tarea es preferible un rodillo autopropulsado).

Utilización de una vibradora "Jackson" en los taludes adyacentes a los muros laterales donde la pendiente era demasiado pronunciada para operar un rodillo con llantas de caucho.

Adición posterior de humedad durante la compactación según se requería.

Aplicación de 0,30 galones por yarda cuadrada de una emulsión de asfalto rociado como operación final de curado. —

#### Aspectos especiales de la construcción

El principal problema lo constituyó la adecuada compactación y mezcla del suelo en las pendientes laterales escarpadas de los canales o las pequeñas y estrechas secciones trasversales circulares. El equipo de construcción no podrá viajar por las áreas escarpadas y no fue fácil trabajar las pequeñas secciones circulares. La improvisación de métodos manuales utilizando la vibradora ya mencionada demostró ser bastante efectiva.

Donde hay sitios de pendiente superior a 5:1, es preferible el suelo-cemento plástico. Sin embargo, en esta instalación los sitios de pendientes pronunciadas fueron pocos. El método empleado consistió en preparar la mezcla de suelo-cemento a nivel del suelo por sobre el área escarpada que se tenía que pavimentar, luego esparcirla sobre el talud y compactarla con el equipo de vibración.

#### Resultados

El revestimiento de suelo-cemento compactado, instalado en 1957, está aún en condiciones generalmente buenas en las secciones planas del

canal. Se ha producido algún deterioro en las pendientes escarpadas. Parece que la causa de dicho deterioro es la falta de uniformidad en el mezclado del suelo y el cemento y la compactación inadecuada.

El costo de contrato para este revestimiento de suelo-cemento en 1957 fue de Dls. 1,60 por yarda cuadrada.

### Evaluación y Conclusiones

Las evaluaciones basadas en las observaciones hasta la fecha sobre estos canales indican lo siguiente :

1. - El suelo-cemento compactado y colocado propiamente, empleando la proporción correcta de suelo-cemento, proporciona resistencia contra la acción congelante del clima y la erosión superficial.
2. - El método del suelo-cemento compactado es particularmente aplicable a los suelos in situ que son fácilmente pulverizados y que contienen menos del 50% de limo y arcilla.
3. - El proceso del suelo-cemento compactado se adapta mejor a situaciones en que la mayor parte del área está constituida por amplias secciones planas que pueden ser fácilmente recorridas con un equipo ordinario para construcción de caminos u otro equipo especial. En labores las cuales mayormente consisten en canales pequeños y/o en pendientes pronunciadas, el suelo-cemento es el mejor método. Donde hay sólo limitadas áreas de pendientes escarpadas el suelo-cemento -

compactado puede ser instalado con éxito usando los métodos previamente descritos.

4. - Con suelos convenientes y una proporción adecuada de cemento el éxito del suelo-cemento compactado para la estabilización de canales, así como para otros usos, depende del funcionamiento adecuado y diligente de las diferentes operaciones de la construcción. La mayoría de los defectos en los canales actuales pueden atribuirse a inadecuados procedimientos de colocación o vaciado del material. A través del funcionamiento de las operaciones enumeradas anteriormente en la parte de construcción son esenciales para un buen resultado.

#### Método del suelo-cemento plástico

##### El problema

En la Estación Aérea Auxiliar de la Marina de los EE. UU. Whiting Field, 25 millas al este de Pensacola, Florida, el problema consistía en estabilizar numerosos drenes poco profundos adyacentes a pistas de aterrizaje y de tránsito. Bajo las condiciones existentes de suelo arenoso y elevado escurrimiento era difícil conseguir una buena cubierta vegetal en la cual poder descargar este flujo. Se decidió, en consecuencia, concentrar el flujo en zanjas revestidas. Se consideraron tubos subterráneos, concreto reforzado, arena asfáltica mezclada en el sitio, suelo-cemento mezclado en el sitio y suelo-cemento plástico. Se adoptó este último porque pareció ser el más práctico y económico para todos los propósitos.

Este pudo acabarse hasta lograr una sección lisa con buenas características hidráulicas y vino a justificar bajo el punto económico el uso de zanjas poco profundas como una medida de seguridad, en caso de que los aviones patinen hacia afuera de la berma lateral de la pista de aterrizaje. Se consiguió fácilmente buen material para elaborar el suelo-cemento. El suelo arenoso con 10 - 20% de limo, con escasa arcilla, hacen una mezcla ideal al agregársele 15% de cemento en volumen.

### COMPARACION ENTRE CANALES DE SUELO-CEMENTO COMPACTADO Y SUELO-CEMENTO PLASTICO

	Suelo-cemento compactado	Suelo-cemento plástico
Sección del canal	Areas amplias con pendientes inferiores a 5:1. Pequeñas áreas de pendiente superior a 5:1.	Areas amplias de pendiente superior a 5:1 o secciones confinadas pequeñas.
Suelos	Suelos arenosos con 50% de material o menos que pasan el tamiz de malla N° 200.	Suelo arenoso con un máximo de 30% de material que pase el tamiz de malla N° 200 y preferiblemente menos.
Cantidad de cemento	Usense los criterios standard de la ASTM para las cantidades del cemento más un 2% (mínimo)	Usense los criterios standard de la ASTM para las cantidades de cemento más 4% (mínimo).
	Pruebas standard de la ASTM de seco-mojado y de congelación-deshielo	
Agua	Humedad óptima-densidad máxima como lo determina la Prueba Standard del Próctor.	Agua suficiente para producir plasticidad.
Acabado	Rodillo autopropulsado de ruedas neumáticas planas en pendientes 5:1 o menos. Compactadora de cabrestante vibratorio o rodillo plano cuesta arriba y cuesta abajo en pendientes pronunciadas.	Emparejado a mano, plantillas, y emparejadoras vibratorias.

### Método de construcción

El material fue mezclado en una mezcladora móvil. El sobrante de excavación proveniente de los canales grandes y de las márgenes en pendiente muy erosionadas (cárcavas), proveyó la mayor parte del suelo a un costo nominal.

El contratista instaló un recipiente para medir la cantidad de suelo y desde el mismo se pasaba a la mezcladora para el control de la proporción de cemento. En este punto se agregó bastante agua con el cemento para poder fabricar una mezcla plástica en sitio muy próximo a la zanja que se iba a vaciar. Se verificó la consistencia de la mezcla y cuando era demasiado consistente para ser trabajable se agregó más agua. En las mezclas pequeñas el contratista usó una mezcladora de dos sacos con un cargador terminal para llevar la mezcla al encofrado.

Para zanjas de gran volumen, con flujos de diseño de más de 2 pies de tirante, se utilizó refuerzo en el revestido para controlar el cuarteado de la superficie. Se emplearon malla y cabillas de 3/8" en armazón de 12", instaladas dos pulgadas por debajo de la superficie. Se prefirió este último método.

Se colocaron juntas de expansión cada 100 pies y las juntas de contracción fueron separadas y aserradas a 2" de profundidad en centros de 25 pies.

Se utilizó un llenador de juntas en frío tipo mástique de modo que pudo aplicarse en las juntas sobre las pendientes laterales pronunciadas. Este material se mostró resistente a la elevada temperatura solar de

Florida. El curado se hizo con tierra húmeda o con un compuesto de cura do, mayormente con este último.

#### Puntos de la construcción

El ingeniero a cargo de la obra en el momento del vaciado enumeró los siguientes puntos de la construcción :

1. - La subrasante necesita ser mojada a fondo antes de colocar una mezcla de suelo-cemento plástico.
2. - El suelo-cemento debe ser mezclado completamente usando el suelo apropiado y la cantidad correcta de cemento. No puede emplearse mucha arcilla porque hace a la mezcla muy difícil de trabajar y dificulta el acabado hasta una superficie pareja.
3. - Las operaciones de mezclado y colocación necesitan tener continuidad, pues la mezcla se asienta rápidamente, y si las secciones acabadas son de mezclas de diferente consistencia se observará un cuarteado superficial por la meteorización posterior.
4. - El agrietamiento de la superficie no debe producir perturbación en un revestimiento el cual tenga un grosor de 5 pulgadas como máximo. Las grietas más profundas pueden penetrar sólo 2 pulgadas y luego moverse lateralmente una distancia corta.

5. - Los bordes de las zanjias o acequias deben estar protegidos de modo que el agua no se concentre y luego pueda filtrarse bajo la losa y levantarla posteriormente. Bermas protectoras a lo largo y la ubicación de tomas de agua impedirán esta anomalía.
6. - Las operaciones del curado tienen que ser continuas a las - del acabado debido a que el suelo-cemento se estabiliza rápidamente.
7. - El revestimiento de suelo-cemento cuesta más o menos la mitad de lo que cuesta el concreto.

### Resultados

Los canales revestidos con cemento plástico, instalados en 1953 - aún son muy efectivos al servir el propósito para el cual fueron diseñados, de acuerdo con un reciente informe de inspección. Se ha producido muy poco o ningún deterioro desde la construcción, salvo una ligera decoloración proveniente posiblemente del suelo usado como agregado. El único mantenimiento requerido es la reparación anual y relleno de las juntas de mástique, lo cual es requerido también en los revestimientos en concreto.

### Evaluación y conclusiones

Basado en los resultados de estos trabajos de revestimiento de canales se indican las conclusiones siguientes :

1. - El suelo-cemento plástico parece que es lo ideal para el **revestimiento** de canales en suelos arenosos.

2. - El método plástico es particularmente aplicable a los canales angostos y/o a secciones que tienen un elevado porcentaje de pendientes escarpadas.
3. - La adecuada protección de los bordes del canal y la periódica reparación y relleno de las juntas de masticaje son aspectos esenciales del mantenimiento.
4. - Este método es particularmente útil cuando pueden utilizarse materiales de suelos locales o in situ.

#### ALGUNOS ASPECTOS SOBRE PROTECCION DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA

Se precisa una variación de los procedimientos usuales de construcción cuando se instalan protecciones de taludes muy pendientes en presas de tierra en los cuales se desea una protección relativamente gruesa. Este tipo de protección puede construirse convenientemente a medida que son colocadas y compactadas las capas de tierra para la presa. Las áreas adyacentes al talud exterior (aguas abajo) pueden irse procesando con suelo-cemento en los intervalos en que se coloca cada capa.

El ancho de las colocaciones parciales de material y la distancia de desplazamiento de la colocación de una capa respecto a la otra capa sucesiva de suelo-cemento, dependerá del grosor efectivo especificado para la protección de talud normal a la pendiente y del ángulo que forma el talud.

La aplicación de cemento, el mezclado del cemento portland con el suelo y el agua, la compactación de la mezcla y las operaciones de a

cabado son similares a las operaciones de pavimentado de carreteras en suelo-cemento (1). Debe ponerse especial cuidado de que no haya fisuras o grietas en el suelo natural del cuerpo de la presa donde se colocan las capas sucesivas de suelo-cemento.

El compactado del suelo-cemento a lo largo del borde externo se facilita colocando previamente una capa de suelo de 2 pies de ancho próxima a la capa de suelo-cemento. Esto proporciona una especie de hombrillo lateral para compactar frente a él la capa de suelo-cemento, así como también una cubierta protectora para prevenir la evaporación proveniente del borde del suelo-cemento.

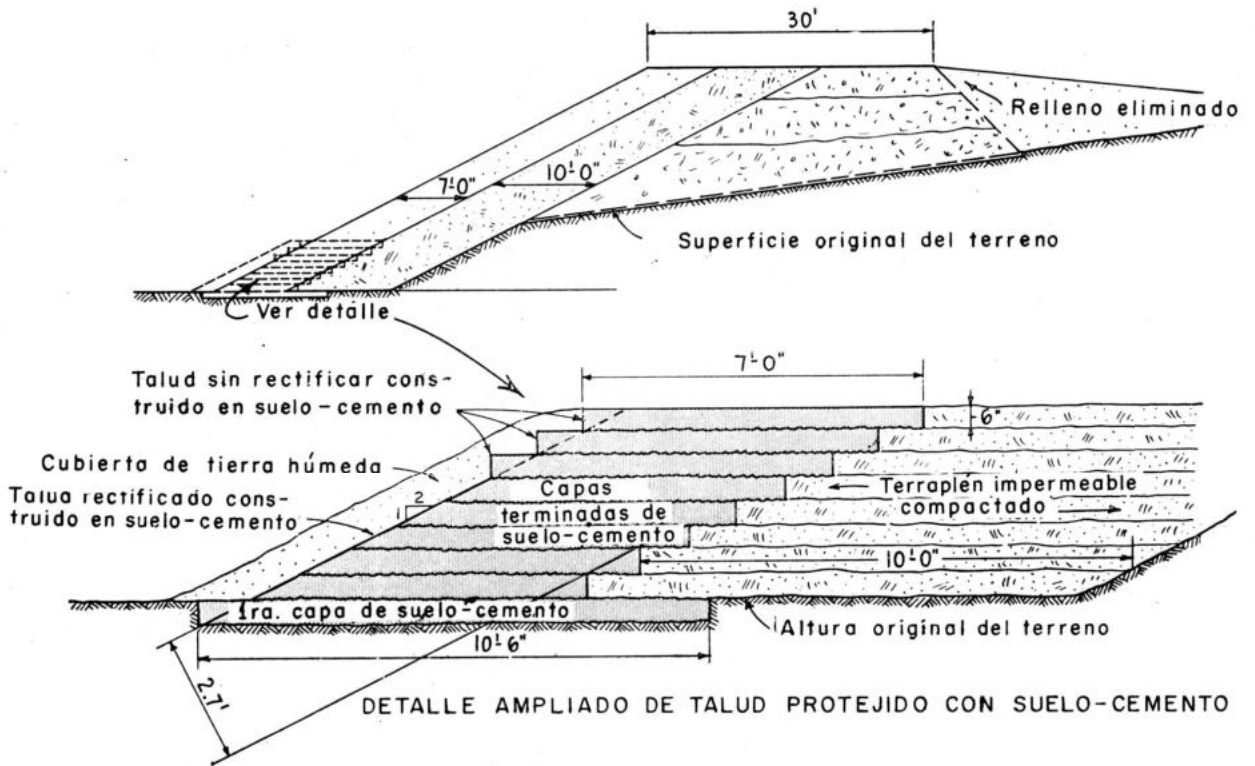
Los requerimientos de las especificaciones para el mezclado, compactado y acabado de las capas de suelo-cemento son los mismos usados en la pavimentación de caminos y carreteras. Estas y otras valiosas sugerencias pueden encontrarse en Especificaciones Sugeridas para capas de base de Suelo-Cemento (1)

Como cada capa sucesiva de suelo-cemento es colocada ligeramente desplazada de la precedente, la protección del talud concluida presenta una superficie rústica y escalonada. Aguas arriba no se recomienda corregir o rectificar el talud con miras a lograr una superficie lisa porque este acabado rústico disipará la energía producida por el oleaje y reducirá así el bordo libre requerido.

---

(1) Detalles adicionales sobre procedimientos de construcción usados para la pavimentación de carreteras, calles y aeropuertos pueden encontrarse en el Manual de Construcción de Suelo-Cemento, publicado por la Asociación de Cemento Portland.

Fig. 3 Trazado y diseño de la protección de suelo-cemento compactado para la sección experimental de la presa Bonny.



Otro método para proteger taludes con pendientes superiores a 5:1, usando suelo-cemento compactado, consiste en mezclar el suelo-cemento cerca o próximo al sitio, y colocar la mezcla directamente en el talud. A veces se usa una instalación fija de mezclado y luego la mezcla es transportada y esparcida uniformemente sobre el talud. La compactación se logra mediante rodillos que son pasados hacia arriba y hacia abajo del talud. Los rodillos son atados mediante cables a tractores ubicados a nivel en la parte superior del talud, y se halan por medio de un "winche" o de una instalación de anclaje, especialmente arreglada para tal fin.

"Especificaciones sugeridas para contratos de trabajos de protección de taludes con suelo-cemento en presas de tierra"

procedencia : Información sobre el suelo-cemento de la Asociación de Cemento Portland

## 1. GENERALIDADES

- 1.1. Descripción : El material de protección de taludes con suelo-cemento lo constituye una mezcla de suelo, cemento portland, y agua, colocada y compactada de tal modo que el suelo-cemento ya acabado en el sitio forme una masa densa y uniforme que se adapte a las alineaciones, gradientes y secciones transversales típicas mostradas en los planos.

Si el contratista puede demostrar que es posible lograr una densidad satisfactoria y uniforme en un grosor de

7 u 8" de capa compactada, en vez del grosor de 6" señalado en los planos, él puede construir capas de ese grosor. Sin embargo, las cantidades adicionales requeridas para mantener la protección normal mínima en la capa de mayor grosor no será medida para efectos del pago como se dispuso en la sección 7.

## 2. MATERIALES

- 2.1 Suelo : El suelo consistirá en el material seleccionado y aprobado en la forma determinada en la Sección 3.1 o 3.2. El suelo preparado para la construcción no debe contener material retenido en un tamiz de 3" ni ningún material que sea de letéreo al reaccionar con el cemento.
- 2.2 Cemento Portland : El cemento portland debe cumplir las más recientes especificaciones para el mismo (ASTM C 150, C 175, o C 205; AASHO M 85, M 134, o M 151; o Federal SS-C-197) para el tipo especificado. Un pie cúbico de cemento portland se considerará con un peso de 94 libras y 1 barril de cemento con un peso de 376 libras en los EE. UU. y de 350 libras en Canadá.
- 2.3 Agua : El agua debe estar exenta de sustancias nocivas para el endurecimiento del suelo-cemento.

### 3. DOSIFICACION

- 3.1 Método corriente : El contratista usará el agregado de suelo, contenido de cemento y coeficiente de humedad determinados por el ingeniero de acuerdo con las pruebas usuales de laboratorio y establecidas en alguna parte del proyecto y de las especificaciones.
- 3.2 Método alternativo : El contratista puede emplear un agregado de suelo, cantidades de cemento, y coeficiente de humedad distintos a los anotados en la Sección 3.1 bajo aprobación - por escrito del ingeniero. Tales alternativas propuestas - deben llenar los siguientes requisitos previos a cualquier - consideración por parte del ingeniero :
- 1) El agregado de suelo propuesto debe contener no me- nos del 60% de material en peso seco que pase por el tamiz N° 4, y no más del 35% ni menos del 5% de ma- terial que pase por el tamiz N° 200. El análisis del - tamiz aquí descrito debe llevarse a cabo a expensas - del contratista por un laboratorio experimentado en - ensayos de suelos y con la aprobación por escrito del ingeniero.
  - 2) La durabilidad del suelo-cemento y demás pruebas si milares descritas en alguna otra parte de las especificaciones deben ser llevadas a cabo a expensas del - - contratista y sometido a la aprobación del ingeniero -

mediante ensayos de laboratorio aceptados.

- 3) Los ensayos deben indicar un suelo-cemento de calidad igual o superior a la anotada en la Sección 3.1.
- 4) Los ensayos no deben retardar la prosecución de la obra en la forma prevista en alguna otra parte en los documentos del contrato.

#### 4. EQUIPO

- 4.1 Descripción : El suelo-cemento puede ser elaborado con cualquier tipo de máquina o combinación de máquinas que produzcan resultados que satisfagan los requerimientos de construcción establecidos en las Secciones 5.1 a la 5.8, inclusives.

#### 5. REQUERIMIENTOS DE CONSTRUCCION

- 5.1 Preparación : Antes que empiece la elaboración del suelo-cemento el área que se va a proteger con él debe ser nivelada y conformada en la forma requerida para construir con este tipo de material y de acuerdo con las alineaciones, pendientes, grosor y secciones transversales mostradas en el proyecto. El terraplén debe ser firme y capaz de soportar el equipo de construcción y las capas de suelo-cemento no deben presentar deformación o asentamiento posterior. Inmediatamente antes de la colocación del suelo-cemento, la

superficie receptora debe estar en buenas condiciones de humedad.

- 5.2 Mezclado : El suelo-cemento será mezclado en una planta - mezcladora central tipo amasadero de dos ejes, de flujo continuo o de tipo dosificadora. La planta estará equipada con instrumentos de medición y de alimentación que agreguen el suelo, al cemento y el agua a la mezcladora en las cantidades especificadas.

Debe proporcionarse al ingeniero libre acceso a la planta en todo momento para efectos de inspección de la operación de la planta y para el muestreo de la mezcla del suelo-cemento y sus componentes. Si las cantidades reales de la mezcla varían en más del 3% de las cantidades especificadas, el ingeniero puede exigir los cambios necesarios en la operación de la planta de modo que den la exactitud requerida.

El tiempo de mezclado debe ser el que se requiera para asegurar una mezcla íntimamente uniforme del suelo, el cemento, y el agua.

- 5.3 Transporte : La mezcla de suelo-cemento debe ser transportada en camiones de plataforma lisa, limpia y hermética. Las plataformas de los camiones deben estar provistas de cubiertas protectoras durante el tiempo desfavorable. El tiempo total transcurrido entre la adición del agua a la mezcla y la iniciación del compactado no debe dejarse en reposo por -

más de 30 minutos durante este período.

El contratista tomará todas las precauciones necesarias para evitar que el equipo cause daño al suelo-cemento cuya colocación y acabado se haya concluido, y para evitar la deposición de tierra natural o de materiales extraños en tre las capas de suelo-cemento. Las rampas de tierra que cruzan el suelo-cemento terminado deben tener un grosor compactado de 2 pies por lo menos.

- 5.4 Colocación: La mezcla será colocada en el terraplén hume decido, o previamente tratado con suelo-cemento, con un e quipo esparcidor que pueda producir capas del ancho y grosor necesarios para la compactación a las dimensiones requeridas en las capas de suelo-cemento a construir. Cada capa sucesiva será colocada tan pronto como sea práctica mente posible, después que se haya colocado y acabado la capa precedente.

Todas las superficies de suelo-cemento que deben u nirse a las capas de suelo-cemento adyacentes, deben ser mantenidas húmedas continuamente mediante rociamiento con agua en forma de neblina y hasta la colocación de la ca pa siguiente, teniendo presente que al contratista no se le va a obligar a mantener mojadas tales superficies por un período superior a los 7 días. Todo material suelto que a parezca en la superficie de la capa cuya colocación se ha

concluido debe ser removido y la superficie humedecida in mediatamente antes de la colocación de la próxima capa.

El suelo-cemento no será mezclado o colocado cuando la temperatura del aire esté a menos de 45°F. Sin embargo, si la temperatura está por lo menos a 40°F y en ascenso, se puede proceder a la construcción del suelo-cemento.

- 5.5 Compactación : El suelo-cemento debe ser compactado uni formemente hasta por lo menos el 96% de la densidad máxima determinada por los ensayos de densidad de campo. La humedad óptima y la densidad máxima deben determinarse en el campo durante la construcción, mediante la prueba de densidad-humedad de la ASTM D 558 o de la AASHO T 134.

Al iniciarse la compactación, toda la mezcla debe es tar en una condición uniforme y suelta y su contenido de hu medad no debe ser ni inferior ni superior a dos puntos de porcentaje por sobre la humedad óptima especificada. No se dejará en reposo ningún sector del cuerpo que está en proceso de compactación por más de 30 minutos. La compactación final de la mezcla a la densidad especificada debe completarse dentro de 1-1/2 horas después de la coloca ción.

- 5.6 Acabado : Después de la compactación, la capa de suelo-cemento será conformada tanto como sea necesario para lograr las alineaciones, rasantes y secciones transversales

requeridas, y cepillada o aplanchada hasta obtener una superficie razonablemente lisa y pareja.

- 5.7 Curado : Las superficies de empates o uniones que queden expuestas temporalmente, deben conservarse húmedas, tal como se estableció en la Sección 5. 4.

Las superficies permanentemente expuestas deben ser curadas con una cubierta protectora de tierra de 6" de grosor, la que será mantenida en buenas condiciones de humedad durante 7 días; o bien pueden ser cubiertas con algún otro material de curado conveniente, sujeto a la aprobación del ingeniero. Todo daño a la cubierta protectora debe ser reparado a satisfacción del ingeniero.

Independientemente del método de cura usado, a las superficies permanentemente expuestas se las mantendrá hasta que se aplique la cubierta protectora, lo cual debe hacerse tan pronto como sea factible, con un límite máximo de tiempo de 24 horas entre el acabado de la superficie y la aplicación de la cubierta protectora o membrana. Debe mantenerse la precaución de asegurarse de que no se aplica a las superficies de uniones o empates ningún material de curado sino solamente agua.

Cuando sea necesario, el suelo-cemento será protegido del congelamiento durante 7 días después de su construcción mediante una cubierta de tierra suelta, paja, u otro

material conveniente aprobado por el ingeniero.

- 5.8 Mantenimiento : Se le exigirá al contratista, dentro de los alcances de su contrato, que mantenga al suelo-cemento en buenas condiciones hasta que se concluya y sea aceptada toda la obra y hasta que haya transcurrido el período de garantía. El mantenimiento incluirá las reparaciones inmediatas de cualesquiera defectos que se produzcan. Esta labor será realizada por el contratista a sus expensas y será repetida cuantas veces sea necesario. Los sitios donde aparezcan trabajos defectuosos deben ser reconstruidos en toda la extensión y profundidad de la capa.

## 6. INSPECCION Y ENSAYO

- 6.1 Descripción : El ingeniero hará, con la asistencia y la cooperación del contratista, la inspección y ensayos que juzgue necesarios para asegurarse que la obra se ajusta a las condiciones y especificaciones del contrato. Estas inspecciones y pruebas pueden incluir, pero no se limitarán a ello, (1) la toma de muestras para el ensayo del suelo-cemento y sus componentes individuales en todas las etapas de la elaboración y después de fabricado, y (2) la rigurosa observación de la operación de todo el equipo usado en la obra. Sólo serán aprobados por el ingeniero los materiales, máquinas, y métodos que cumplan con los requerimientos establecidos en el contrato.

Todo el ensayo del suelo-cemento o de sus componentes individuales, a menos que se estipule específicamente - de otro modo en el contrato, será de acuerdo a las más recientes especificaciones aplicables de la ASTM o de la - - AASHO efectivas para la fecha del aviso de licitación del proyecto.

## 7. MEDICION Y PAGO

7.1 Medición : Esta obra será medida (1) en yardas cúbicas de talud protegido con suelo-cemento perfectamente acabado y aceptado de acuerdo con las especificaciones que se señalan en el proyecto; y (2) en barriles de cemento incorporado en el suelo-cemento y en el talud sujeto a protección, de acuerdo a las instrucciones del ingeniero.

7.2 Pago : Esta obra será pagada al precio unitario del contrato por yarda cúbica de protección de talud con suelo-cemento y al precio unitario de contrato por barril de cemento suministrado, multiplicado por las cantidades de obra obtenidas de acuerdo con la Sección 7.1. Dicho pago constituirá el reembolso total por toda la obra necesaria para completar la protección de talud con suelo-cemento, incluyendo humedecimiento, curado, la asistencia de inspección y ensayo, y todas las otras operaciones incidentales.

"La protección con suelo-cemento es retributiva"

tomado de : "Era de la Recuperación" (Reclamation Era), vol. 49, N° 4, Nov. 1963. Bureau of Reclamation, Departamento del Interior de los EE. UU., Washington, D. C. Reproducido con autorización de la Asociación de Cemento Portland.

La investigación sobre el problema de la protección de presas de tierra llevada a cabo durante más de 13 años por el Bureau of Reclamation está pagando gruesos dividendos hoy día en algunas regiones de los EE. UU.

Estos dividendos originados por la investigación están ahorrando cerca de Dls. 1.343.000 en las licitaciones para protección de taludes en las presas Mervitt y Chaney en la cuenca del Missouri. Estos ahorros fueron posibles por el uso de suelo-cemento en vez del enrocado que protege los taludes de las presas de tierra contra la erosión, la acción del oleaje y demás elementos adversos.

El enrocado es la protección convencional a base de piedra consistente y duradera, colocada sobre el talud de las presas de tierra a profundidades de 3 o más pies. En el área de las Llanuras no es fácil conseguir roca de estas características y fue precisamente en esas áreas (plains area) donde mayor uso tuvo el suelo-cemento como elemento de protección para taludes de presas.

El suelo-cemento colocado sobre el talud aguas arriba de una presa consta de suelo o tierra, cemento portland y agua, mezclados en una planta mezcladora fija y colocada la mezcla sobre el talud para su compactación. Su aspecto externo es el de una terraza escalonada.

La escasez de piedra apropiada para el enrocado se constató durante el planeamiento de las presas Merritt y Cheney, a tal extremo que 4 de los 7 contratistas que licitaban para la construcción de la protección de los taludes en la presa Merritt no presentaron cotizaciones en base a la protección mediante cubierta de rocas. Cuatro de los ocho licitantes para la presa Cheney no lograron presentar cotizaciones sobre enrocado.

Durante muchos años el elevado costo de transporte de inmensas cantidades de piedra desde largas distancias infló el costo de construcción en la cuenca del Missouri. En una ocasión se hizo necesario transportar material por tren y camiones a través de 250 millas; este problema se presentó en la presa Bonny en el lado oriental del Colorado donde se necesitaron 500.000 toneladas de piedras para el enrocado. Fueron llevadas desde Golden, Colorado, en camiones, trasbordadas a vagones de ferrocarril en Boulder, llevadas en barco a Burlington, y finalmente en camiones hasta el sitio de la presa.

En 1950, el Bureau se abocó de lleno a la solución de este problema. Se emprendieron extensas exploraciones y ensayos de materiales para una adecuada protección de las presas de tierra.

Luego de las pruebas de laboratorio se construyó un terraplén experimental usando suelo-cemento en un sitio problema típico. La ubica

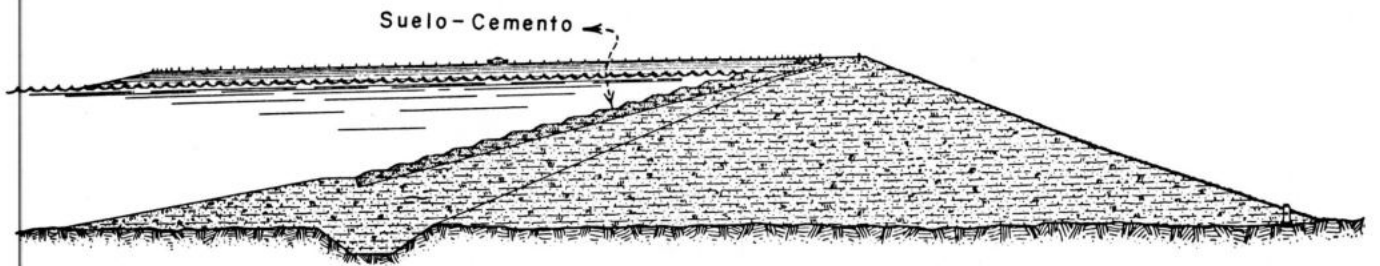
ción fue el embalse de la presa Bonny en el lado oriental del Colorado - que es pobre en rocas. Se le seleccionó por encontrarse ubicada a una distancia razonable de los laboratorios de Denver. Se construyó un terraplén de prueba lejos de la presa misma y en una posición a merced de la máxima acción del oleaje, la congelación y el deshielo, la humedad y la sequía, y otras condiciones propicias para la erosión.

El estudio continuó por un período de 10 años a fin de determinar el comportamiento de la superficie. Se necesitaron reparaciones menores durante los primeros períodos de la prueba, pero no fueron de naturaleza tal que hicieran poner en duda el valor del material o las técnicas.

El deterioro de la superficie como consecuencia de los ciclos de meteorización y erosión, fue insignificante. Ni siquiera el lavado del hielo hacia arriba y hacia abajo del talud logró producir un daño considerable. Se concluyó luego que podría construirse una protección de suelo-cemento para presas de tierra estable y resistente al oleaje, usando métodos convencionales en su colocación.

El costo de ensayo de este nuevo procedimiento de construcción alcanzó a unos Dls. 80.000, cantidad la cual ha sido ahorrada muchas veces en proyectos donde se ha utilizado suelo-cemento. Basados en la investigación realizada, pueden conducirse otras pruebas de naturaleza similar a costo nominal.

Cada nuevo uso del suelo-cemento requiere un cuidadoso análisis del suelo disponible y la proporción del cemento con respecto al suelo o arena variará del 9 al 14% por peso de suelo seco. Los métodos corrien



Esquema de un corte donde se muestra la adición de suelo-cemento usado para la protección del talud interior de la presa MERRIT

tes de construcción han cambiado algo a partir del ensayo en la presa Bonny donde la colocación de los materiales secos se hizo en el sitio antes -- del mezclado y humedecido. En la actualidad el procedimiento establecido consiste en usar una planta fija de mezclado o una planta mezcladora dosificadora para asegurar una mezcla completa y uniforme.

El procedimiento detallado es el siguiente : (1) mezclado del suelo, del cemento portland y del agua; (2) colocación, esparcimiento y nivelación del suelo-cemento en capas; (3) compactación hasta la densidad requerida; y (4) adición de agua o cobertura en la forma requerida para mantener el coeficiente de humedad durante el período del curado. Se agregan las capas para conseguir el grosor conveniente.

El éxito obtenido en la presa Bonny fue lo que abrió el camino para el uso del suelo cemento en la presa Merritt del río Snake. Se trata de una presa de tierra con una altura de 140 pies y una longitud de cresta de 3.100 pies. Aproximadamente 51.000 yardas cúbicas de suelo-cemento aplicado a una profundidad de 24" protegerá la superficie. Las economías serán de unos 643.000 dólares con relación al costo del enrocado.

Este material fue usado también en Cheney donde la estructura rellena con tierra, se eleva a 86 pies sobre el lecho del río Ninnercah, a 25 -- millas al oeste de Wichita, Kansas. La cresta de la presa se extiende a 24.500 pies, y tiene un talud aguas arriba que requiere 180.000 yardas cúbicas de suelo-cemento. Aquí el uso de este material significó economías de casi Dls. 700.000.

Un nuevo uso se ha establecido para la mezcla de suelo-cemento y fue seguido en la reciente colocación de un revestimiento de suelo-cemen-

to en la cámara o pozo disipador temporal en la presa Sanford del Bureau que se está construyendo en el río Canadian cerca del Amarillo, en Texas. El pozo disipador de tierra, revestido con 5 pies de suelo-cemento, se -- emplea para amortizar el flujo del río donde éste está siendo estrechado -- para la construcción de la presa y estará en uso durante unos dos años.

El uso del suelo-cemento se irá ampliando; ya el Estado de Nuevo - Méjico está aprovechando los beneficios de las investigaciones del Bureau. Los representantes del estado y la firma de ingeniería que suscribieron un contrato para la construcción de la presa Ute cerca de Logan, Nuevo Méjico, visitaron el sector de prueba de la presa Bonny a comienzo de 1962. - El personal estudió cuidadosamente los registros del ensayo, y después - de consultas adicionales con la Oficina del Ingeniero Jefe, se especificó el suelo-cemento para la presa Ute.

Con el planeamiento y construcción de cada nuevo proyecto del Bu-- reau se dispone de más y mejores datos que hacen posible construir me-- jor con menor gasto. El cuidadoso ensayo de nuevas ideas y el aprovecha-- miento de las viejas han perfeccionado los pasos previos en este campo - de la construcción.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. American Road Builders' Assoc., "Soil-cement Stabilization", Technical Bulletin N° 191, 1953.
2. Bureau of Reclamation, "Lining for Irrigation Canals", - U.S. Dept. Int., 1963.
3. Bryant, John W., "Spillway Apron Paved with Soil-cement", Engineering News-Record, August 5, 1954, p. 32.
4. Byrne, W.S. and W.G. Holtz, "Soil-cement Lining Placed Mechanically", Engineering News-Record, Dec. 25, 1947, pp. 48-51.
5. Clare, K.E. and D.M. Farrar, "The use of cements of different fineness in soil-cement mixtures", Magazine of Concrete Research, Nov. 1956, pp. 137-144.
6. Engineering News-Record, "Asphaltic concrete and soil-cement tested as substitutes for riprap", March 26, 1953, p. 37.
7. Johnson, Earl G., "Soil-cement for channel stabilization", Agricultural Engineering, July 1962, pp. 402-404.
8. Portland Cement Association, "Soil-cement for paving slopes and lining ditches", 1953.
9. -----, "Soil-cement Construction Handbook", 1956.
10. -----, "Soil-cement Laboratory Handbook", 1959.
11. -----, "Essentials of Soil-cement", 1958.
12. -----, "Soil-cement pavement", 1961.
13. -----, "PCA Soil Primer", 1962.
14. Reclamation Era, "Soil Cemento Protection Pays", Vol. - 49, N° 4, Nov. 1963.