

Mejoramiento del comportamiento de suelos y materiales con la incorporación de aditivos no convencionales

Evaluación preliminar

Es muy poco lo que se puede hacer por conocer las características intrínsecas de los aditivos ya que se trata de productos de composición compleja sobre la cual existe reserva y no se proporciona ninguna información determinante; respecto al campo de aplicación, corre a cargo de los productores. En consecuencia la primera actividad a acometer es la evaluación y verificación de las propiedades y características de los materiales tratados.

El objeto de este trabajo es el de presentar los primeros resultados de trabajos de evaluación y verificación que a manera de proyectos de grado se han realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

JORGE TAMAYO TAMAYO
Profesor asociado
Ingeniero Civil
Universidad Nacional

Pag. 24 — 32
Ingeniería e Investigación
Volumen 3 N° 2
Trimestre 1 — 1985

Una característica de los tiempos actuales, en lo que se refiere a la ingeniería de materiales para carreteras, es el desarrollo de nuevas técnicas y tratamientos tendientes a lograr el máximo aprovechamiento de propiedades y características; buena parte de estos esfuerzos se ha orientado hacia la producción de inductores y modificadores de comportamiento de suelos y materiales.

En Colombia han aparecido recientemente en el mercado nuevos agentes estabilizantes para suelos y materiales, mejoradores de adherencia y estabilidad en mezclas asfálticas, rejuvenecedores y reductores de asfaltos, e inductores de estabilidad volumétrica para suelos potencialmente expansivos; estos productos se promocionan con base en resultados de pruebas de laboratorio y campo en donde se han obtenido respuestas muy halagadoras.

¿Qué actitud tomar por parte de diseñadores y constructores frente a este hecho? Necesariamente una actitud positiva a la vez que cautelosa, acompañada de un programa de investigación y evaluación en cuya metodología se contemplen las siguientes actividades: estudio del producto y campo de aplicación, evaluación y verificación de propiedades y características en los materiales tratados, estudio y diseño de las técnicas de incorporación y manejo, análisis de experiencias recientes y formulación de un programa de seguimiento al comportamiento del material tratado; en todas las fases enumeradas debe considerarse el aspecto económico.

ADITIVO DS-328 PARA ESTABILIZACION DE SUELOS Y MATERIALES (Ref. 1).

Características del aditivo:

Se trata de un líquido de color verde, de composición metal-orgánica que requiere de un neutralizante para su labor estabilizadora.

De acuerdo a los análisis de laboratorio el DS-328, se podría clasificar como una mezcla de ésteres insaturados de intercambio catiónico e hidrocarburos, en donde predominan los cationes de sodio y potasio y en menor grado hierro y aluminio; por su pH puede clasificarse como un aditivo de tipo alcalino.

Mecanismo de estabilización:

Al no poderse establecer plenamente la composi-

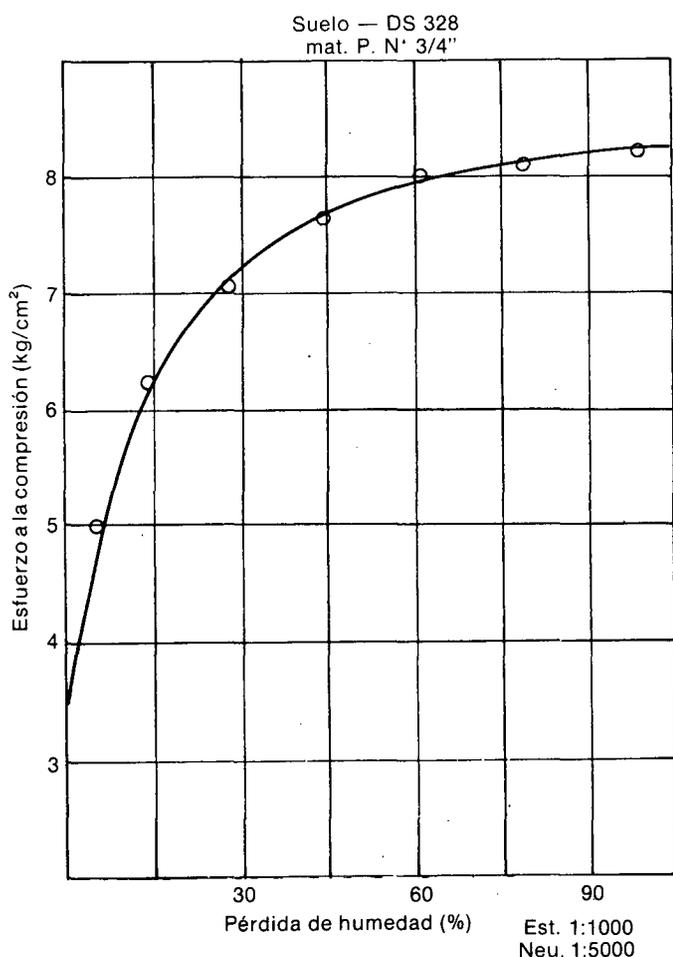


FIGURA 1.

ción química del aditivo solo se puede inducir cuál podría ser el mecanismo de estabilización.

Los cationes de sodio y potasio, libres en la reacción buscan el agua en los minerales arcillosos formando hidróxidos y reaccionando con el silicio, generando de esta forma una nueva estructura basada en enlaces más fuertes; otra acción que se induce es la de impermeabilización, la cual se puede adjudicar a la presencia de los hidrocarburos en el aditivo. El neutralizante en razón de su alto poder de intercambio catiónico agiliza el proceso de floculación o coagulación, haciendo las veces de un catalizador; además ayuda a mantener un pH alto, lo cual favorece el proceso de estabilización.

El aditivo presenta una actividad en función del contenido de humedad, estableciéndose que su

mayor actividad se manifiesta cuando se ha perdido un 40% de la humedad de compactación, tal como se puede observar en la figura N° 1.

Características de los materiales empleados:

Dado que su campo de aplicación incluye la estabilización de suelos granulares y finos se escogieron dos materiales: un recebo típico de la Sabana de Bogotá y la arcilla que se encuentra superficialmente en la Ciudad Universitaria.

Recebo

Procedente de la recebiera La Punta, presenta 48% de fracción gruesa de forma angular, 26% de arena y 26% de finos, conformando una granulometría que se puede calificar como bien gradada; el límite líquido es de 27 y el índice de plasticidad 9.

Arcilla

Se trata de una arcilla caolinítica oxidada, fisurada, e inorgánica, con una fracción tamaño arena del 20% y 80% de finos; de acuerdo a la USC clasifica como CL ya que el límite líquido es 42 y el índice de plasticidad 21.

Dosificación del aditivo:

El aditivo hace parte del agua de compactación y se incorpora de la siguiente manera: se preparan dos probetas, una con el 60% del agua a adicionar, en la cual se incluye el estabilizante —DS-328— y otra con el 40% del agua en donde se coloca el neutralizante.

Usualmente se trabaja con una relación de cinco partes de estabilizante por una de neutralizante con las siguientes dosis: 1:1500E/1:7500N, 1:1000E/1:5000N y 1:500E/1:2500N; esta última notación significa: una parte de estabilizante por cada 500 de suelo seco, en peso y una de neutralizante por cada 2.500 de suelo seco. La dosis también se puede presentar considerando conjuntamente el neutralizante y el estabilizante, lo cual significa 8, 12 y 24 por cada 10.000 de suelo seco.

Una vez se haya preparado el material se adiciona en primer lugar el agua con estabilizante y se mezcla hasta obtener una muestra homogénea, luego se adiciona el agua con el neutralizante y se termina el mezclado. No debe permitirse la mezcla de los 2 componentes antes de que se incorporen en la masa de suelo.

Propiedades geomecánicas del recebo estabilizado

La evaluación de las propiedades geomecánicas del

FIGURA 2. Estabilización del recebo con el DS-328

Dosis de estabilizante y neutralizante	E = 0				E 1 : 1500			E 1 : 1000			E 1 : 500		
	N = 0				N 1 : 7500			N 1 : 5000			N 1 : 2500		
Dosis de (E + N)/Ws	0/10.000				8/10.000			12/10.000			24/10.000		
Energía de compactación (k-cm)/cm³	Wp	γd	CBR		Wp	γd	CBR	Wp	γd	CBR	Wp	γd	CBR
	%	ton/m³			%	ton/m³		%	ton/m³		%	ton/m³	
27.3	9.3	2.00	44		8.8	2.02	47	8.5	2.04	71	7.2	2.05	90
12.9	10.8	1.91	27		10.0	1.94	39	9.2	1.96	62	9.0	2.01	76
5.9	12.2	1.84	8		11.4	1.86	18	11.0	1.88	40	9.5	1.87	50

recebo se hizo con base en las pruebas usuales en nuestro medio: CBR, compresión inconfiada, límites de Atterberg, resistencia al corte UU en la prueba triaxial, absorción y resistencia a la inmersión.

Capacidad relativa de soporte, CBR

Se elaboraron tres probetas por cada dosis de aditivo a tres energías de compactación: $E_1 = 27.3$, $E_2 = 12.9$, $E_3 = 5.9$ Kg-cmt/cm³, las cuales se penetraron después de permanecer 96 horas en inmersión; los resultados de CBR peso unitario seco y humedad de penetración se presentan en la figura Nº 2 en función de las dosis de aditivo.

Como tendencias de lo mostrado en la gráfica se pueden establecer las siguientes:

- a. El CBR muestra una tendencia creciente con la dosis de aditivo y con la energía de compactación, siendo mayor la ganancia de resistencia cuando se pasa de 8/10.000 a 12/10.000.
 - b. Los porcentajes de incremento en el valor del CBR con respecto a los del suelo no tratado son:
- | E | 8/10.000 | 12/10.000 | 24/10.000 |
|-------|----------|-----------|-----------|
| E_1 | 6.8 | 61.4 | 104.6 |
| E_2 | 44.4 | 129.6 | 181.5 |
| E_3 | 125.0 | 400.0 | 525.0 |
- c. Si bien el incremento porcentual no es una medida significativa para valorar la efectividad de un tratamiento, sí se puede concluir que el aditivo es más contundente a menores energías.

- d. Lo que sí se puede concluir es que con este tratamiento se puede habilitar un material como este recebo, para que pueda ser empleado como material de base, según el criterio de CBR.
- e. Bien podría pensarse que con la segunda dosis de aditivo se alcanza un equilibrio de cargas eléctricas, lo cual explica en parte el cambio brusco que se presenta en el comportamiento; sin embargo no es una explicación totalmente satisfactoria ya que se espera una respuesta creciente pero gradual.
- f. Con miras a establecer la permanencia de las propiedades estabilizantes del aditivo, se procedió a someter tres probetas a la prueba del CBR en las cuales se obtuvo un valor promedio de 60; el material de las probetas se pulverizó y secó en el aire y luego se volvió a compactar adicionándole agua. A estas nuevas probetas se les determinó el CBR y se obtuvo un valor de 55; lo anterior está indicando que el efecto estabilizante se mantiene a diferencia de lo que ocurre con otros agentes estabilizantes, lo cual se constituye sin lugar a dudas en una característica muy favorable.
- g. No se observa ningún cambio sensible en el peso unitario máximo ni en la humedad de penetración, lo cual está indicando que las propiedades índices del material no se modifican.

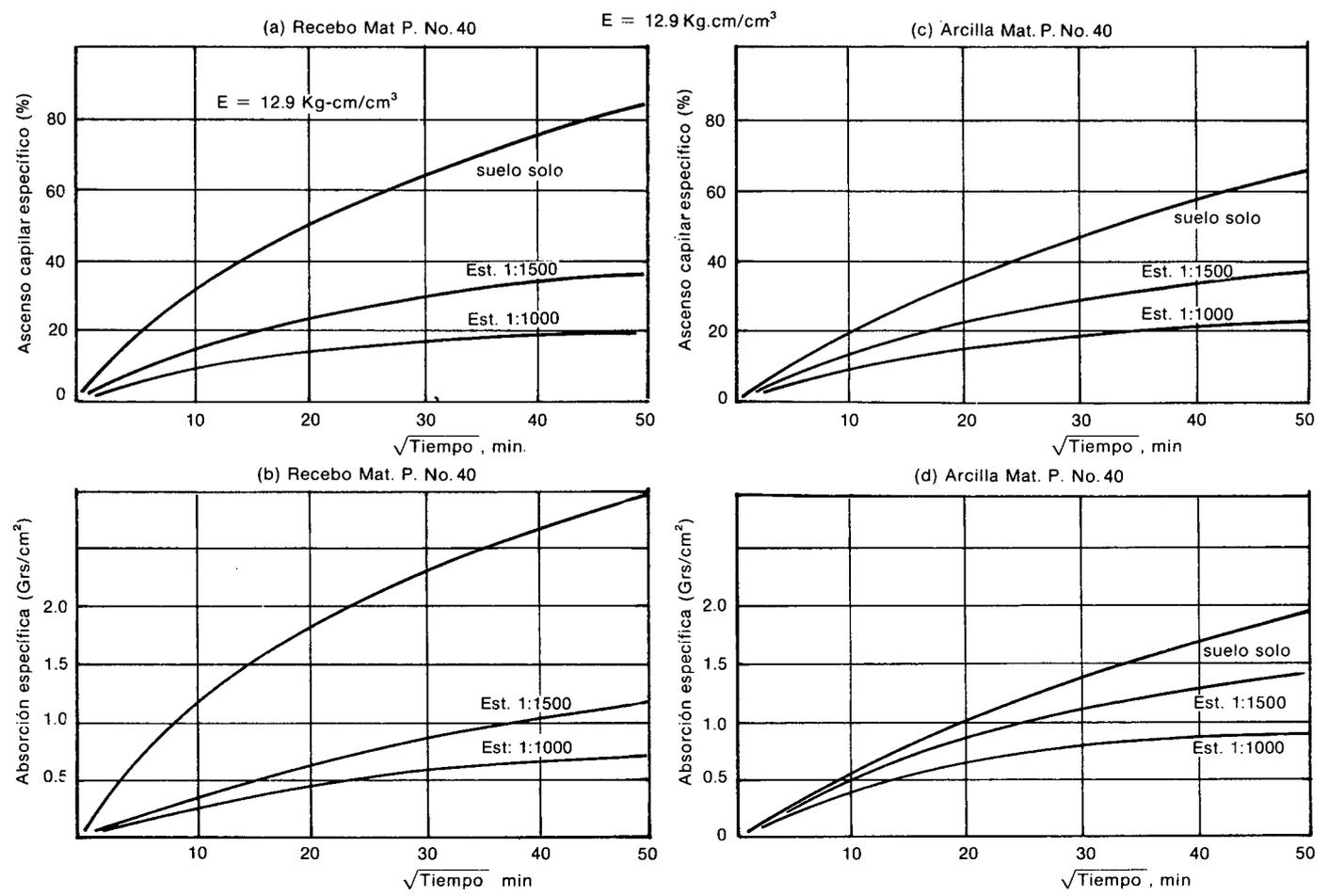


FIGURA 3.

Compresión inconfínada

Las probetas se elaboraron de acuerdo al procedimiento indicado, se guardaron en cuarto húmedo por 3,7 y 28 días y se sometieron durante cinco horas en inmersión antes de ser falladas; los resultados son los siguientes:

Edad días	Resistencia a la compresión inconfínada K/cm ²	
	24/10.000	12/10.000
3	5.3	3.7
7	6.3	5.0
28	6.9	5.5

Se observa que la resistencia crece ligeramente con el tiempo pero dentro de márgenes muy estrechos, lo cual está indicando nuevamente que una vez se hayan obtenido las condiciones de humedad propicias para la acción estabilizante, ésta permanece casi invariable con el tiempo.

Capilaridad/absorción

Se elaboraron especímenes de acuerdo al procedimiento indicado y se colocaron sobre piedras porosas en un recipiente con agua destilada, en donde el nivel del agua quedaba a ras con las piedras; a varios intervalos de tiempo se tomaron lecturas del ascenso de agua y se determinó el incremento de peso para calcular la absorción específica, calculada como el incremento de peso dividido por el área transversal. En la figura N° 3, se presentan los resultados en función de la raíz cuadrada del tiempo, los cuales están indicando que el aditivo inhibe la capilaridad y la absorción de agua.

Resistencia frente a la inmersión

Se trata de una evaluación netamente cualitativa en donde se colocaron probetas totalmente inmersas en agua, observándose el comportamiento con el tiempo.

La probeta de recebo sin tratamiento se desintegró completamente al cabo de 30 horas, mientras que la probeta con 12/10.000 de aditivo presentó un desmoronamiento rápido en los primeros minutos, quedando claramente definidos los planos de compactación; después de 30 minutos se estabilizó el desmoronamiento siendo del orden de un 25% a las ocho horas y de un 50% al cabo de dos meses.

Expansión libre

Los resultados de la prueba de expansión libre

hechas sobre probetas de 6.4 cm. de diámetro y 2.5 cms. de altura, compactadas a humedad óptima con una energía de 12.9 K-cm/cm³, con y sin aditivo, sobre material que pasa la malla N° 40, son los siguientes:

Característica	0/10.000	8/10.000	12/10.000
Humedad inicial %	10.00	9.90	8.60
Expansión libre %	1.06	0.78	0.53
Humedad final %	24.70	19.60	16.30

Consecuente con otros comportamientos, el aditivo reduce sensiblemente la inestabilidad volumétrica de los finos.

Límites de Atterberg

No se presenta ninguna modificación con la incorporación del aditivo en los límites líquido y plástico.

Resistencia al corte UU — Prueba triaxial

Se hicieron pruebas sobre probetas sometidas a curado, con y sin período de inmersión, empleando dos presiones de cámara 0.5 y 1.0 K/cm²; los resultados son los siguientes:

a. Sin inmersión

Presión de cámara K/cm ²	0/10.000		12/10.000	
	Cu K/cm ²	Eaf%	Cu K/cm ²	Eaf%
0.5	3.38	7.00	8.90	3.30
1.0	3.67	7.60	10.30	2.60

b. Con inmersión

0.5	----*	3.00	5.60
1.0	----*	3.43	5.00

* Las probetas se desintegraron en el proceso de inmersión.

Se trabajó con material que pasó por la malla 3/4" y la mayor energía de compactación, elaborando probetas de 10.2 cmts. de diámetro y 20.4 cmts. de altura; las probetas se guardaron siete días en cuarto húmedo.

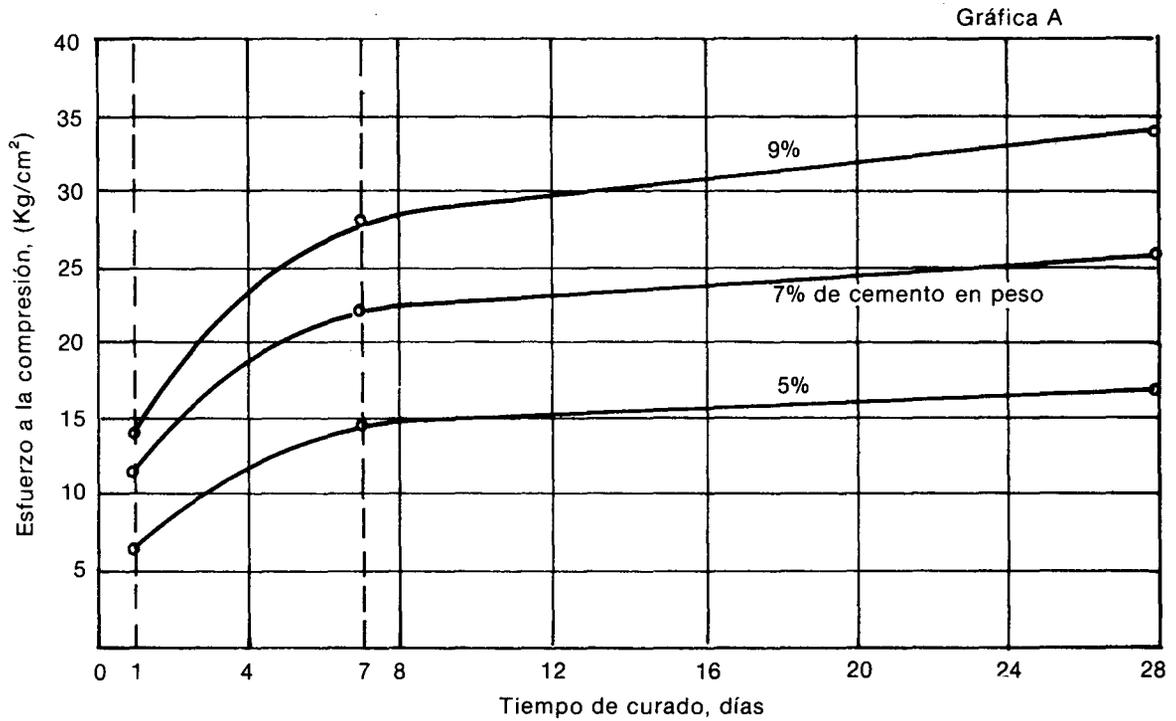
Es evidente el mejoramiento que se consigue en el comportamiento esfuerzo/deformación del recebo estabilizado, lo cual significa mayor resistencia y menor deformabilidad, aunque lo anterior podría derivar en una mayor propensión hacia la fragilidad y la falla por fatiga.

Propiedades geomecánicas de la arcilla estabilizada:

La evaluación se hizo con base en pruebas de CBR, capilaridad, resistencia a la inmersión, expansión libre y límites de Atterberg.

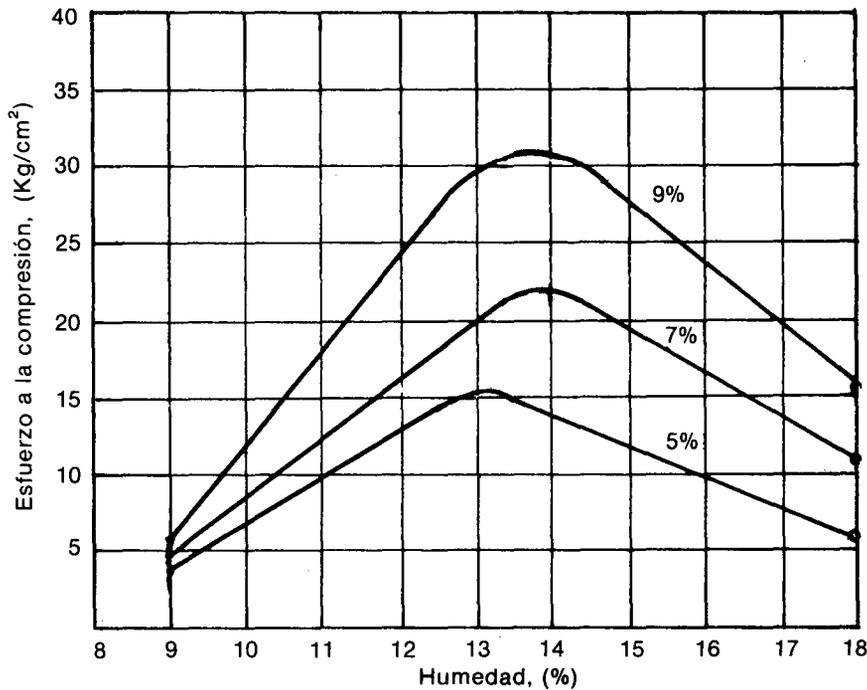
FIGURA N° 4. Estabilización de suelos arcillosos con el DS-328

Dosis de estabilizante y neutralizante	E : 0				E 1 : 1.500				E 1 : 1.000				E 1 : 500			
	N : 0				N 1 : 7.500				N 1 : 5.000				N 1 : 2.500			
Dosis E+ N con respecto a Ws	0/10.000				8/10.000				12/10.000				24/10.000			
Energía de compactación (k - cm)/cm ³	W	γ_d	CBR	Exp	W	γ_d	CBR	Exp	W	γ_d	CBR	Exp	W	γ_d	CBR	Exp
	%	ton/m ³	%	%	%	ton/m ³	%	%	%	ton/m ³	%	%	%	ton/m ³	%	%
27.3	17.4	1.81	22	3.7	17.6	1.80	47	1.5	16.0	1.82	53	1.2	15.4	1.87	56	1.0
12.9	21.8	1.67	10	0.8	20.7	1.67	30	0.3	18.2	1.72	32	0.3	18.2	1.70	33	0.3
5.9	23.6	1.61	9	0.7	23.6	1.60	20	0.3	21.0	1.60	20	0.2	23.8	1.59	20	0.2



Valores de resistencia a la compresión, (Kg/cm ²)			
Humedad, (%)	5% C.	7% C.	9% C.
9	3.55	4.9	5.4
12	13.30	16.4	24.4
15	11.60	19.7	27.5
18	6.10	11.0	15.9

Observaciones: Los valores de la tabla se obtuvieron a partir de las probetas de ensayo: Humedad — Densidad.



RESULTADOS

% C	ω_{apt}	σ (k/cm)
5.0	13.07	15.5
7.0	13.9	22.0
9.0	13.9	31.0

FIGURA 5.

Capacidad relativa de soporte

En la figura Nº 4 se condensan todos los resultados de CBR, expansión y humedad correspondientes a la mayor compactación; de su análisis se puede concluir lo siguiente:

a. Las propiedades índices, peso unitario y humedad óptima, no sufren ninguna modificación

significativa.

b. A mayor dosis de aditivo menor expansión, lo cual es completamente lógico y concordante con el eventual mecanismo de acción.

c. En el CBR se presentan los siguientes incrementos netos:

Máxima pérdida en peso (A — 2 — 4):14%

Ensayo de durabilidad	
% Cemento en peso	Pérdida en peso
5.0	7.9
7.0	6.2
9.0	5.5

Agua retenida después del secado a 110°C. : 2,5%

% Cemento	Resistencia (Kg/cm ²)		
	1 día	7 días	28 días
5.0	6.9	14.6	16.1
7.0	11.5	22.0	25.0
9.0	14.5	28.0	33.5

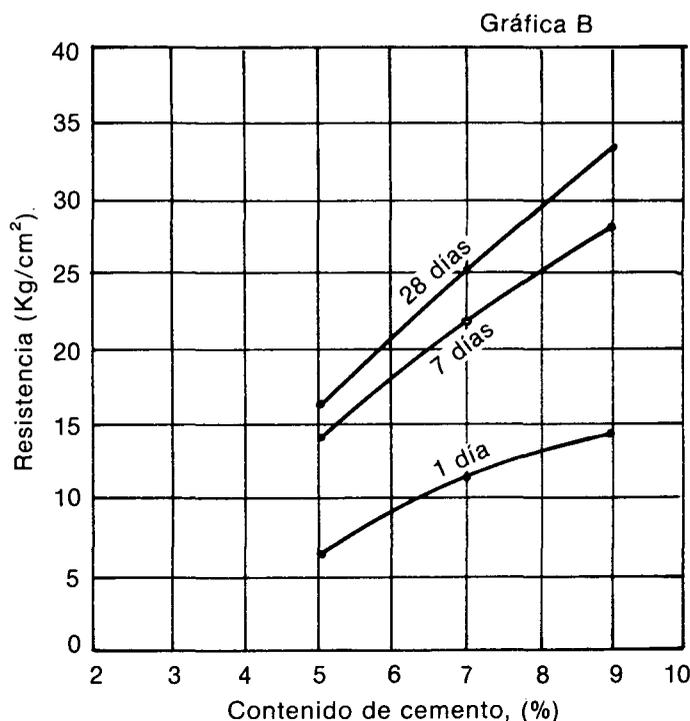
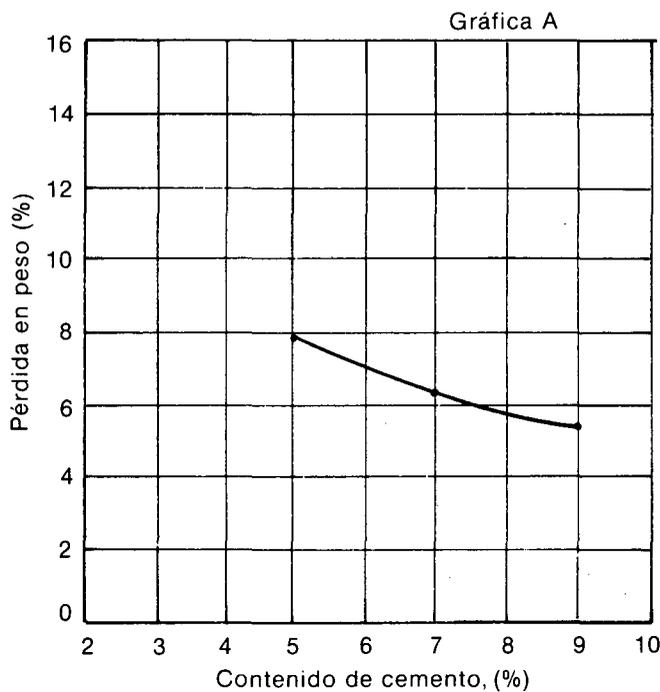


FIGURA 6.

E	8/10.000	12/10.000	24/10.000
E ₁	114	141	155
E ₂	200	230	230
E ₃	122	122	122

en donde la efectividad es mayor a niveles de energía intermedios.

- d. Si se analizan solamente las magnitudes del CBR se puede concluir que el aditivo puede llegar a habilitar la arcilla como material para base en carreteras de tráfico liviano; sobre lo que sí no hay dudas es en el mejoramiento global, resistencia y estabilidad, que se alcanza con la energía intermedia y normal, permitiendo emplear la arcilla estabilizada como sub-base, sin ninguna reserva.

Capilaridad/Absorción

En la figura N° 3, se presentan los resultados de las pruebas de Capilaridad/Absorción; su evaluación ya se explicó; se inhibe el ascenso capilar, pero justo es reconocerlo, no en un gran porcentaje. Ello se debe a que la estructura de la arcilla compactada no sufre modificaciones sensibles por la incorporación del aditivo.

Resistencia frente a la inmersión

La probeta de arcilla sin aditivo presentó un desmoronamiento del 20% a los 70 minutos, afectando principalmente la parte inferior; a los dos

meses se desconformó completamente la probeta. Las dos probetas tratadas se mantuvieron casi intactas a lo largo del lapso de evaluación.

La acción del aditivo frente a esta sollicitación es más manifiesta con la arcilla que con el recebo, lo cual es completamente explicable.

Expansión libre

Característica	0/10.000	8/10.000	12/10.000
Humedad inicial %	10.0	10.0	10.0
Expansión libre %	7.6	5.4	3.5
Humedad final %	30.8	25.2	21.8

Se observa cómo se reduce significativamente la expansión esperándose que para mayor porcentaje de aditivo la expansión sea mucho menor.

Límites de Atterberg

No se produce ninguna modificación, lo cual corrobora la insensibilidad de las propiedades índices ante la incorporación del aditivo.

COMPARACION CON ADITIVOS CONVENCIONALES

Estabilización del recebo con cemento:

La evaluación se hizo de acuerdo a los procedimientos de la PCA para el método simplificado y la prueba de durabilidad; los resultados se muestran en las figuras Nos. 5 y 6 y de su análisis se puede concluir lo siguiente:

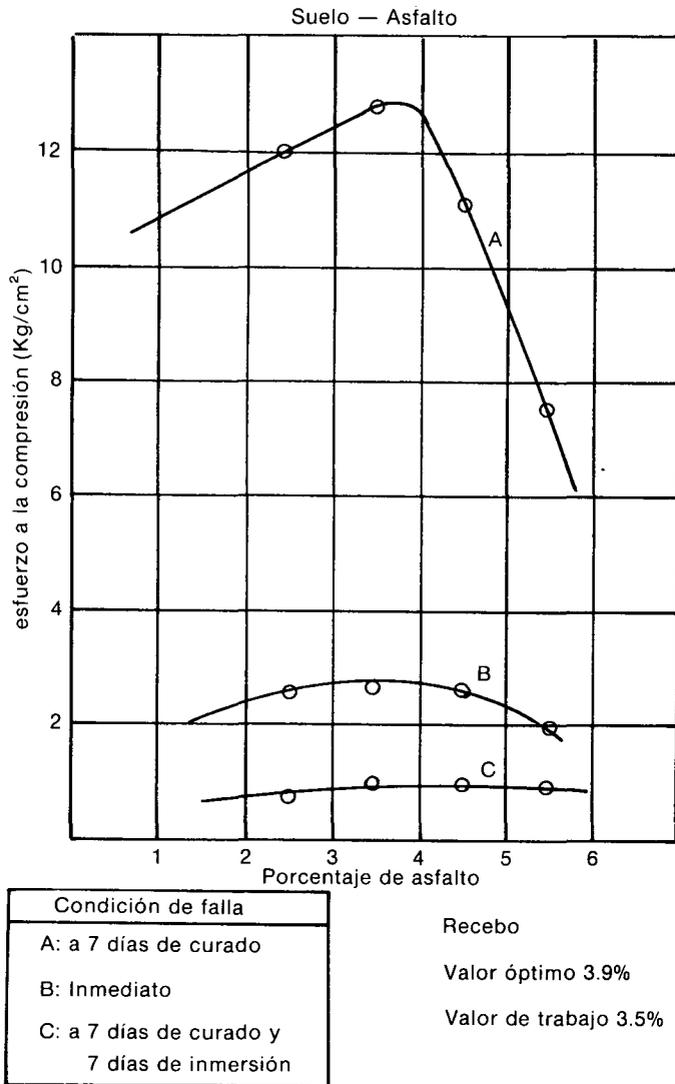


FIGURA 7.

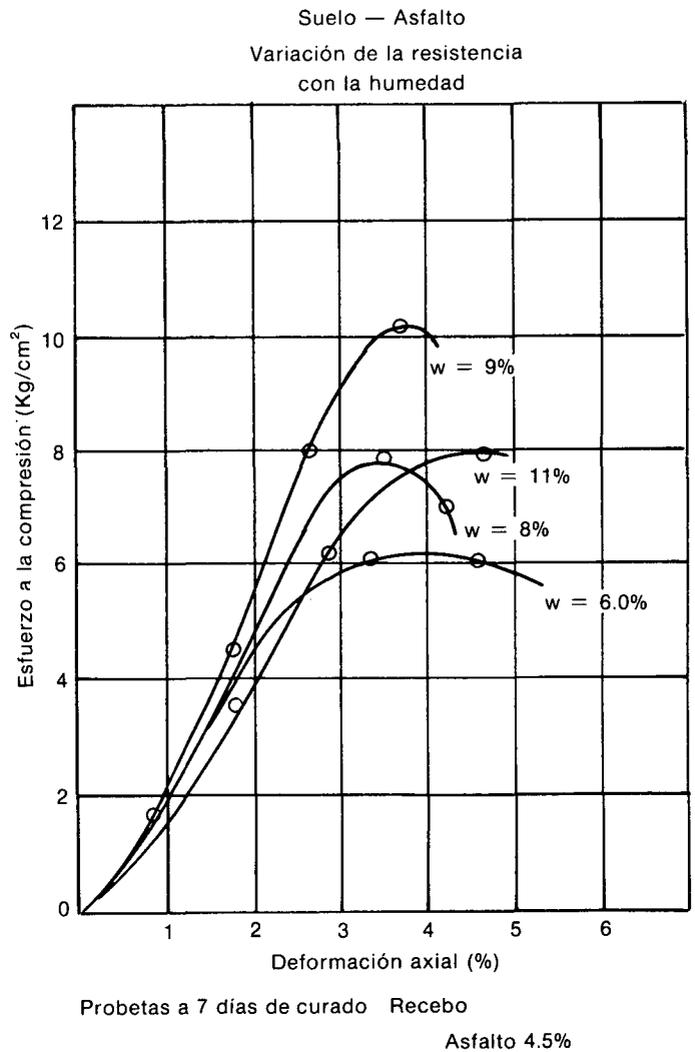


FIGURA 8.

- Como era de esperarse el recebo empleado responde muy bien al tratamiento con cemento tanto en términos de resistencia como de durabilidad.
- Se optó por recomendar como porcentaje óptimo 5% atendiendo principalmente el criterio de durabilidad.

Estabilización del recebo con asfalto líquido:

El beneficio de la adición de asfalto se estudió con base en pruebas de compactación y de resistencia a la compresión inconfiada evaluada en condiciones diferentes de curado e inmersión. En las figuras Nos. 7 y 8 se presentan los resultados más importantes.

Por la composición granulométrica del recebo, el tratamiento con asfalto no resulta el más adecuado; si bien los resultados no dan lugar a mayores expectativas, sí se presenta un mejoramiento significativo en las propiedades del recebo.

Evaluación comparativa entre los tres estabilizantes:

La evaluación se hizo con base en la prueba triaxial UU, con probetas de 10.2 cmts. de diámetro y 20.4 de altura, empleando material que pasa por la malla de 3/4" y en las condiciones más propicias

para cada estabilizante. Los resultados se presentan en las figuras 9 y 10.

De esta evaluación comparativa se concluye que el recebo tratado con el DS-328 presenta condiciones de esfuerzo/deformación intermedias entre las mostradas por el suelo-cemento y el suelo-asfalto; el mejoramiento en el comportamiento del recebo con el DS-328 es bastante apreciable pero sigue siendo muy sensible a la condición de inmersión.

Otro aspecto es la escasa influencia de la presión de cámara en el resultado, quedando el comportamiento en función del contenido de agua en el momento de ensayar el espécimen; se explica por la presencia de los finos en proporción significativa.

CONCLUSIONES

Análisis económico:

En las condiciones de mercadeo actuales, la alternativa de estabilización con el DS-328 viene a ser un 100% más costosa que las otras contempladas; pese a que la evaluación se hizo considerando únicamente criterios de resistencia, las cifras son bien contundentes y muestran claramente la situación actual.

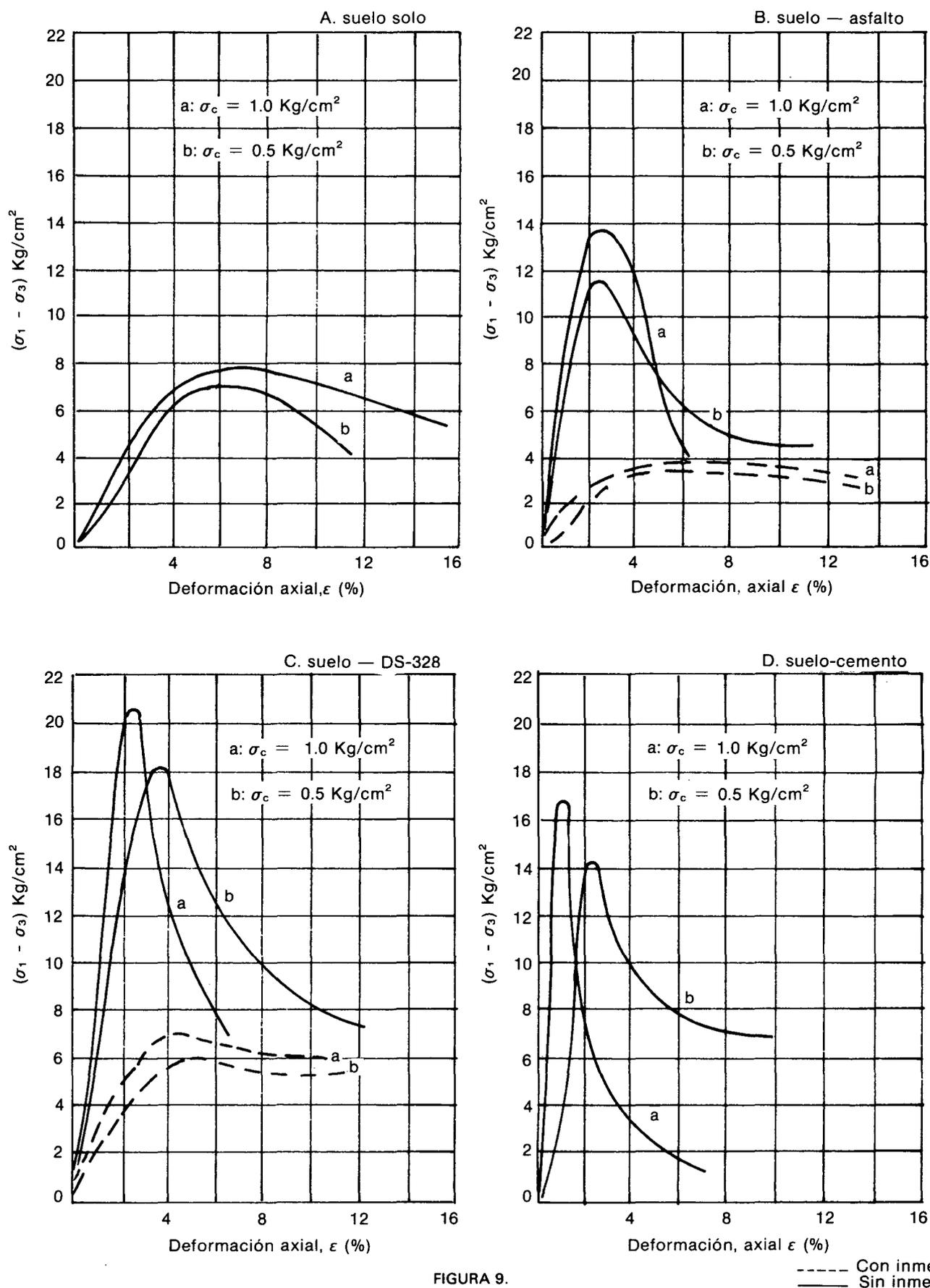


FIGURA 9.

Recomendaciones:

Si bien el arte de la estabilización está muy deprimido en Colombia es necesario seguir estudiando el comportamiento de los suelos tratados y no tratados, orientando el esfuerzo hacia la optimi-

zación de las propiedades de suelos y materiales; para lo anterior se requieren metodologías y pruebas apropiadas, como las aplicadas en este estudio. Es necesario hacer énfasis sobre el aspecto más importante en el comportamiento de los suelos

Ensayo triaxial: U.U.

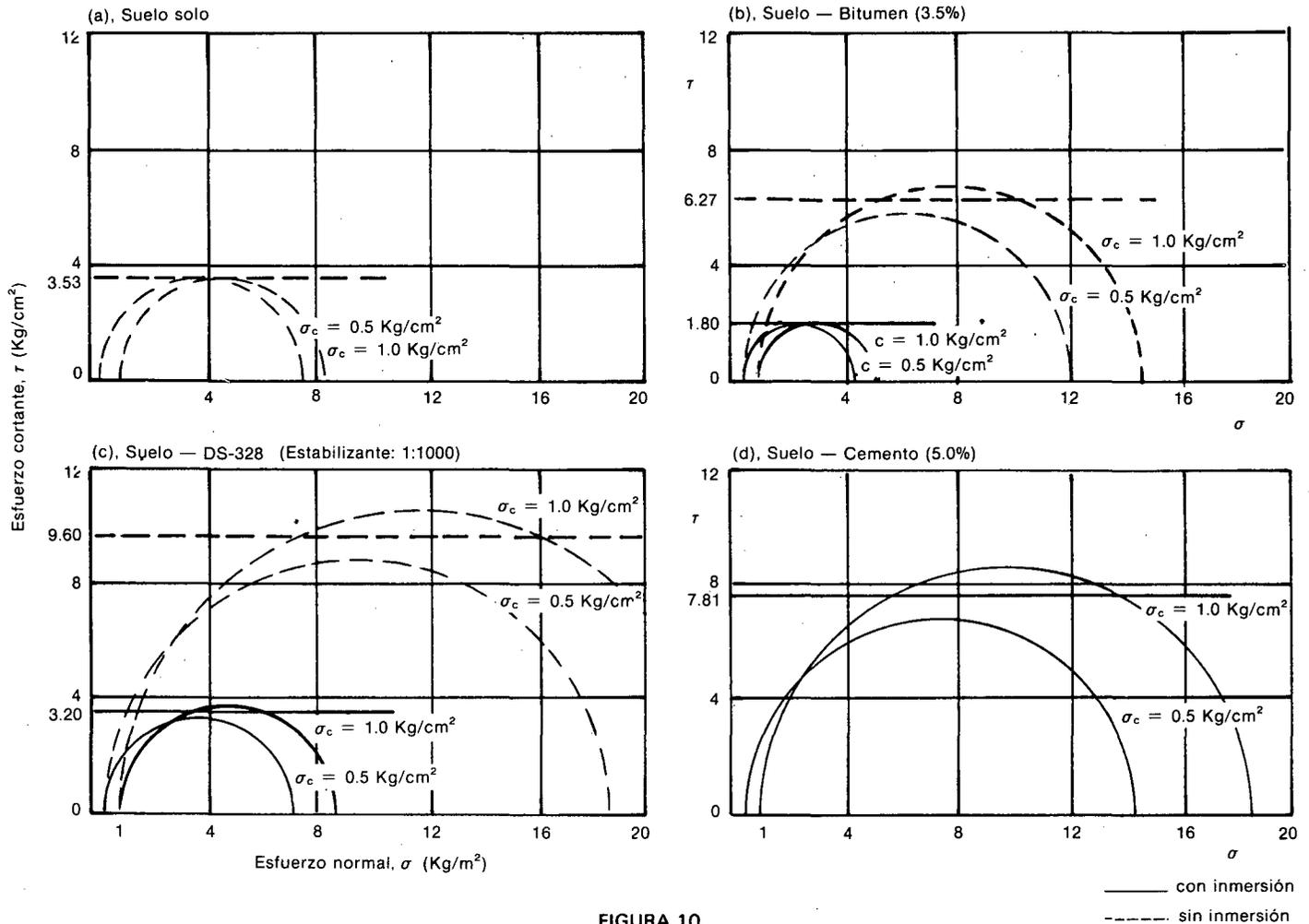


FIGURA 10.

estabilizados, la relación esfuerzo/deformación, propiedad que solo se puede evaluar en pruebas triaxiales; se requiere por lo tanto hacer los montajes e implementaciones indispensables con el fin de trabajar con información significativa.

Conclusiones:

Sin analizar otros aspectos tan fundamentales como son: procesos constructivos y comportamiento con el tiempo, se puede afirmar que el DS-328,

pasó la prueba de verificación y que su principal virtud radica en el mejoramiento balanceado que se obtiene en todas las propiedades geomecánicas de los suelos y materiales tratados.

Es importante que investigaciones similares se efectúen con otros materiales a fin de incrementar el conocimiento, sobre este y otros aditivos, a la espera de que la evaluación económica nos permita considerarlos muy pronto como verdaderas alternativas competitivas en todos los aspectos.

BIBLIOGRAFIA

Reyes, Hernando; Gómez, Armando y Moreno, César. "Estabilización de materiales con aditivos convencionales y no convencionales". Proyecto de grado dirigido por el ingeniero Jorge Tamayo T. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1983.