

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO DE MATERIALES MARGINALES ESTABILIZADOS CON CEMENTO, CAL Y OTRO PRODUCTO

N. Pérez & P. Garnica  
Instituto Mexicano del Transporte, México  
[nperez@imt.mx](mailto:nperez@imt.mx), [pgarnica@imt.mx](mailto:pgarnica@imt.mx)

## RESUMEN

Las arcillas son suelos que generalmente no cumplen con especificaciones para ser utilizados como material de construcción de carreteras, por tanto, cuando se encuentran en los proyectos carreteros y es necesario utilizarlas, se requiere estabilizarlas de tal forma que sus propiedades se mejoren. Este artículo muestra en qué grado arcillas de alta compresibilidad mejoraron sus propiedades con respecto a propiedades que se obtienen en estado natural. Los datos obtenidos se determinaron de pruebas de compresión simple, valor relativo de soporte, módulo de resiliencia y pruebas de humedecimiento y secado. Como se observa de los resultados, existen propiedades que se mantienen constantes a partir de un cierto tiempo de curado y otras que tienden a reducirse.

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de vías de comunicación es una parte fundamental en el desarrollo de un país. De las vías de comunicación pueden mencionarse las carreteras, los aeropuertos, puertos, ferrocarriles, etc. Las primeras pueden estar pavimentadas con asfalto o con concreto hidráulico cuando son carreteras de altas especificaciones; en el caso de caminos rurales sólo se revisten o sólo se conforman con los materiales que se encuentran en la zona.

En todos los países se cuenta con organismos que regulan varios aspectos de las vías de comunicación. En México, la Secretaria de Comunicaciones y Transportes es el organismo regulador que proporciona especificaciones que deben de cumplir los materiales que se usan en la construcción de caminos y carreteras del país. Por otro lado, una de las problemáticas que se tienen que resolver antes de iniciar la construcción del proyecto es localizar los bancos de materiales para cada una de las capas que formarán la estructura. Asimismo, se presentan ocasiones en donde será necesario utilizar materiales como las arcillas de alta compresibilidad, como por ejemplo, en el caso de caminos secundarios. Debido a esto, la estabilización del material es una de las técnicas generalmente utilizada en el mejoramiento de las propiedades del material. En el siguiente inciso se presentan algunos aspectos relacionados con la estabilización de suelos y posteriormente se presentan los resultados obtenidos en el estudio llevado a cabo.

## 2. ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES

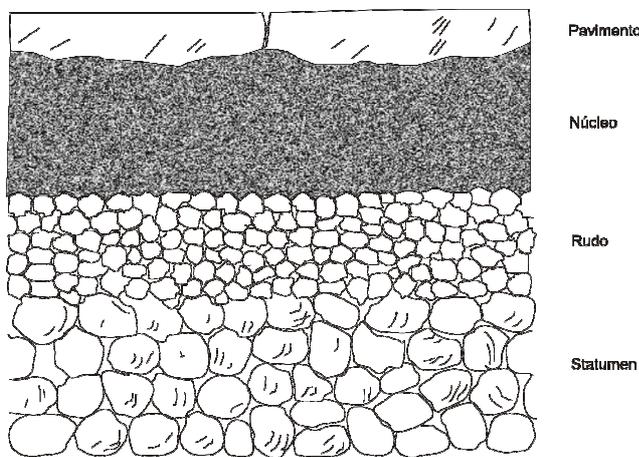
La estabilización de suelos es una técnica que se ha utilizado desde tiempos antiguos para lograr uno o varias características de las que se pueden mencionar: reducir la expansión/contracción de un suelo, incrementar la resistencia, reducir el espesor del pavimento, utilizar materiales locales, reducir la susceptibilidad a la humedad, reducir la

cantidad de polvo generada al paso de los vehículos, proporcionar una plataforma de trabajo, etc.

Para llevar a cabo la estabilización de un material, se debe conocer cómo trabaja el producto y el impacto que éste tendrá en las propiedades que se desean mejorar. Por ejemplo, cuando se adicionan los productos se pueden presentar tres fenómenos principalmente: encapsulamiento de partículas, ligazón y formación de nuevos componentes. El grado y velocidad al que se presenten cada uno de ellos dependerá de la composición del estabilizante. Por ejemplo, el asfalto encapsula y liga, por tanto, incrementa la resistencia y reduce la susceptibilidad a la humedad. Las cenizas volantes requieren de un activador como cal o cemento y después de agregar agua ocurren reacciones cementantes y como consecuencia ligazón de partículas. Este material también incrementa la resistencia de los materiales y disminuye susceptibilidad a la humedad. Asimismo, el cemento combinado con agua produce hidratación y se forman nuevos componentes; dependiendo de la composición química del cemento, puede darse una reacción entre los silicatos y aluminatos de la arcilla.

### 2.1. Estabilización con cal

La estabilización con cal tiene sus orígenes en tiempos muy antiguos. Un ejemplo del uso de la cal lo muestran los caminos Romanos. Una de las evidencias que se tienen es la estructuración que tenían sus caminos. Éstos estaban formados por cuatro capas. En la parte inferior se tenía una capa de roca llamada statumen, le seguía una capa formada por arena y grava y gravilla que recibía el nombre de "rudus". A continuación un revestimiento formado por roca triturada mezclada con cal llamada "nucleus". Finalmente, la superficie era el pavimento, es decir, las losas de roca tallada (Figura 1).



(a) Estructuración de los caminos romanos

(b) La vía Apia

Figura 1 – (a) Estructuración de los caminos romanos; (b) Superficie de la vía Apia [1]

Por tanto, no es de sorprender que hasta la fecha la cal sea uno de los productos que se utilizan con mayor frecuencia al llevar a cabo mejoramiento de materiales.

La literatura en este tema muestra que un sistema suelo-agua al ser mezclado con cal produce una reacción exotérmica. La reacción inicial es el resultado de intercambio catiónico de  $Ca^{2+}$  por los cationes existentes en la arcilla. El efecto inicial de la cal es producir material más seco y más quebradizo [2], por otro lado, a largo plazo se presenta

un fenómeno de solidificación que ocurre como resultado de las reacciones puzolánicas que se facilita por la alcalinidad de la mezcla, lo que promueve la disolución del aluminio y el silicio de la arcilla [2]. Este proceso trae como consecuencia que se formen las puzolanas de aluminio y silicio para que se de la reacción con el calcio [3]. Después de esto se producen compuestos con propiedades cementantes lo que hace que la resistencia del material se incremente. La cal es un material que se utiliza generalmente en estabilización de varios tipos de suelos, sin embargo, para el suelo que tiene mejor efecto es en la arcilla. De hecho, se recomienda usar cal como estabilizante cuando el suelo contiene al menos un 25 % de arcilla o cuando el índice plástico es mayor a 10. Algunos de los beneficios de la cal pueden ser los siguientes: Reduce la plasticidad, reduce la capacidad de absorción del material, reduce la expansión y mejora la estabilidad, etc

## 2.2. Estabilización con cemento

El cemento está formado por silicatos de calcio y aluminatos de calcio que combinados con agua se hidratan y forman materiales cementantes de silicatos de calcio hidratados y aluminatos de calcio hidratados. De igual forma, durante la reacción se forma hidróxido de calcio (cal), producto que hace posible la reacción puzolánica con el aluminio y el silicio que se presentan en los materiales arcillosos [4]. Las reacciones antes mencionadas son las que hacen posible los cambios en las propiedades del material estabilizado.

En la literatura se reportan varias investigaciones sobre comportamiento de materiales suelo-cemento, un ejemplo es el estudio de [5] en el cual se estabilizaron tres materiales con diferentes productos. Una arcilla del norte de Virginia (CL), una arcilla Staunton (CH) y una arena de Lynchburg (SM). Uno de los estabilizantes utilizados en el estudio fue el cemento el cual fue aplicado en porcentajes de 3 y 5 %. La Figura 2 muestra los resultados de la resistencia en compresión no confinada obtenidos para los tres suelos. Se puede observar que la velocidad de incremento de la resistencia es mucho mayor para tiempos de curado menores a 15 días; a partir de este tiempo el incremento en la resistencia ya no es importante, sin embargo, el estudio sólo se llevó a cabo para tiempo de curado de 28 días. Otro aspecto importante de estos resultados es que existe una diferencia muy importante cuando el suelo se estabiliza con 3 o con 5 % de cemento y por supuesto, con resultados obtenidos con muestras sin estabilizar. De hecho, la resistencia de las muestras sin estabilizar se mantiene prácticamente constante a medida que transcurre el tiempo de curado. Por otro lado, el efecto del cemento es distinto para los tres tipos de materiales. Se nota que la resistencia del suelo clasificado como CH (arcilla de Staunton) está por debajo (para 3 y 5 %) para los diferentes tiempos de curado, de hecho, las resistencias más altas la alcanza la arena limosa.

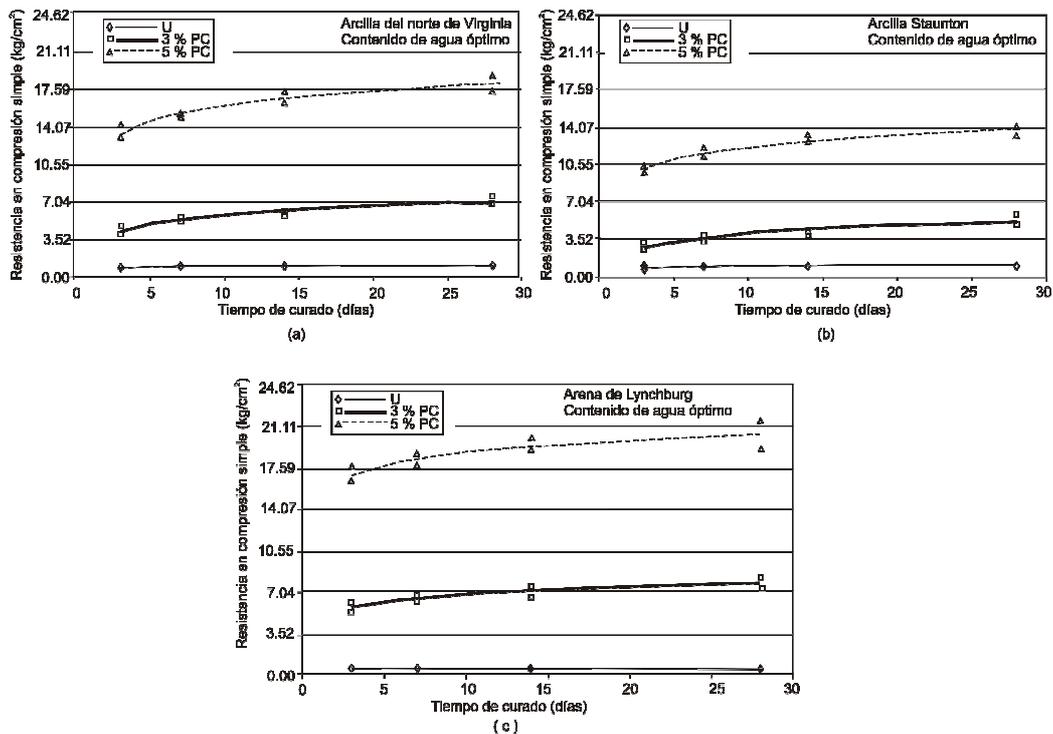


Figura 2 – (a) Tiempo de curado contra resistencia para la arcilla del norte de Virginia; (b) Tiempo de curado contra resistencia de la arcilla Staunton; (c) Tiempo de curado contra resistencia de una arena [5]

De lo anterior se puede concluir que el efecto que tenga un producto estabilizante puede ser diferente dependiendo del tipo de suelo. Por ejemplo, en este caso, la arena incrementa su resistencia de prácticamente 1 kg/cm<sup>2</sup> cuando no se adiciona ningún estabilizante a un rango de resistencias de 17 a 21 kg/cm<sup>2</sup> cuando se estabiliza con 5 % de cemento.

Otro aspecto relevante en la estabilización con cemento es que la hidratación del cemento es relativamente rápida y provoca que la resistencia se incremente casi de forma inmediata. Por tanto, es práctica general compactar la mezcla lo más rápido posible, usualmente se recomiendan un lapso de dos horas posteriores al mezclado<sup>7</sup>.

### 2.3. Estabilización con polímero

Existen en el mercado otra muy variada cantidad de productos estabilizantes. Para este estudio también se investigó el comportamiento de un polímero que de acuerdo con lo especificado, aglutina las partículas, las consolida y en consecuencia mejora las propiedades de los materiales.

## 3. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Las pruebas que se utilizaron tanto para caracterizar los suelos de prueba como para determinar sus propiedades mecánicas se llevaron a cabo de acuerdo con normas ASTM, excepto en el caso de la prueba de módulo de resiliencia la cual se realiza con el procedimiento NCHRP 1-28A. A continuación se describen en forma breve las pruebas más relevantes.

### 3.1. Prueba de compresión simple o sin confinar

Esta prueba consiste en colocar la muestra en un marco de carga donde posteriormente se aplica carga a una velocidad que puede estar en el rango de 0.5 a 2.0 %/min; en este trabajo se utilizó una velocidad de 1.2 %/min. La prueba termina cuando la probeta alcanza su resistencia máxima.

### 3.2. Prueba de Valor relativo de soporte (ASTM D 1883)

Esta prueba consiste en compactar un espécimen con contenido de agua y peso volumétrico requeridos. Una vez compactado, se satura durante 96 horas y posteriormente se penetra a una velocidad de 1.27 mm/min. El valor de CBR del material se calcula como:

$$\text{CBR}(\%) = \frac{P_{2.54\text{mm}}}{1360} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$P_{2.54\text{mm}}$  = Carga para una penetración de 2.54 mm

CBR = Valor de Soporte California

### 3.3. Prueba de módulo de resiliencia (Protocolo NCHRP 1-28A)

La prueba de módulo de resiliencia tiene como finalidad determinar los módulos de un material simulando el comportamiento de los materiales sujetos a carga cíclica. En laboratorio esta prueba se lleva a cabo aplicando al espécimen una serie de esfuerzos desviadores en forma cíclica con determinados valores de confinamiento, de tal manera que se obtenga una serie de valores de módulo de resiliencia para diferentes estados de esfuerzos. La prueba consta de 16 secuencias; en la primera fase llamada de acondicionamiento se aplican 1000 ciclos con un esfuerzo desviador de 48.3 kPa y un esfuerzo de confinamiento de 27.6 kPa; para las secuencias posteriores se aplican 100 ciclos (Tabla 1). El tiempo de aplicación de carga se realiza durante 0.1 s seguido de un tiempo de retraso o de descanso de 0.9 s, que simula el comportamiento de un elemento de suelo localizado a nivel de subrasante y que experimenta un esfuerzo provocado por el paso de un vehículo sobre la superficie del pavimento.

Tabla 1 – Secuencia de confinamientos y esfuerzos desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia

Secuencia No.	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)	No. ciclos	Secuencia No.	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)	No. ciclos
0	48.3	27.6	1000	9	69.0	55.2	100
1	27.6	55.2	100	10	69.0	41.4	100
2	27.6	41.4	100	11	69.0	27.6	100
3	27.6	27.6	100	12	69.0	13.8	100
4	27.6	13.8	100	13	96.6	55.2	100
5	48.3	55.2	100	14	96.6	41.4	100
6	48.3	41.4	100	15	96.6	27.6	100
7	48.3	27.6	100	16	96.6	13.8	100
8	48.3	13.8	100				

#### 4. PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYE

Para la preparación de los especímenes de prueba una de las fases importante era la determinación de los porcentajes del producto a ser mezclados con el suelo. Para el caso de la cal, se agregó un 4 % con respecto a peso seco; el cemento se agregó en un porcentaje de 8 % y en cuanto al polímero, la cantidad a agregar al agua de compactación se calculó con base en lo especificado por el fabricante. La Figura 3 muestra la apariencia del agua de compactación una vez que se agrega este último producto.



Figura 3 – Apariencia del agua de compactación después de agregar el polímero

##### 4.1. Compactación de los especímenes para prueba de compresión y módulo de resiliencia

El procedimiento seguido para la compactación de los especímenes de compresión simple y módulo de resiliencia fue el siguiente:

- Preparación de la mezcla suelo-cal, suelo-cemento o suelo-polímero.
- Compactación del espécimen en ocho capas en un molde partido de 14.4 cm de altura y 7.1 cm de diámetro. Para especímenes de suelo-cal y suelo-cemento, los especímenes se compactaron inmediatamente después de preparar la mezcla. Para especímenes de suelo en estado natural se agregó el agua de compactación y se dejó equilibrar por 24 horas, de forma similar para la mezcla suelo-polímero. Al siguiente día se compactaron a peso volumétrico seco máximo con respecto a la prueba Proctor estándar para el suelo 1 y para el suelo 2 se compactaron al mismo peso volumétrico al que se compactaron las estabilizadas con cemento.
- Después de compactar los especímenes, se tomaron sus dimensiones y las masas.
- Posteriormente se ensayaron a los tiempos de curado especificados. Los tiempos de curado que se manejan fueron de 0, 7, 14, 28 y 90 para el suelo 1 y para el caso del suelo 2, los tiempos de curado fueron de 0, 7, 14, 28, 60, 90 y 180.
- Las muestras con tiempos de curado mayor a 1 día se colocaron en un cuarto con humedad controlada por el tiempo especificado.

- Después de cumplir con el tiempo de curado, las muestras se ensayaron en compresión sin confirmar o en módulo de resiliencia.

Las probetas que se utilizaron en el análisis fueron aquellas en donde el contenido de agua varió en el rango de  $w_{opt} \pm 0.5 \%$  y peso volumétrico seco de  $\gamma_{dmax} \pm 1 \%$ .

## 5. MATERIALES DE PRUEBA

### 5.1. Propiedades índice

El suelo utilizado en la estabilización con cal y polímero fue una arcilla clasificada como CH según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, de hecho, este material presenta un límite de contracción de 9.8 % (Figura 4); de igual forma, en la estabilización con cemento se utilizó otra arcilla con la misma clasificación, sin embargo, es menos plástica que la utilizada en el estudio con cal y el polímero. En la Tabla 2 se resumen las propiedades de ambos suelos.

Tabla 2 – Propiedades índice de las arcillas utilizadas en el estudio

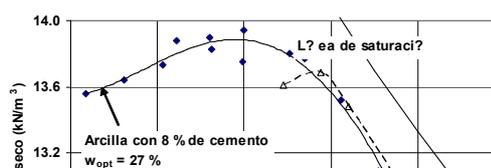
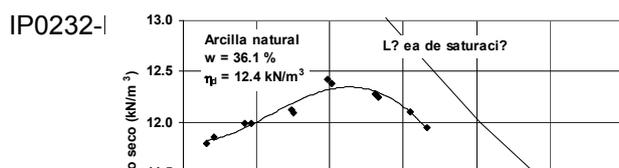
Suelo No.	Clasificación	Límites de Atterberg			% que pasa la malla 200	$G_s$
		LL (%)	LP (%)	IP (%)		
1	CH	94	62	32	95.6	2.74
2	CH	55	30	25	81.4	2.59



Figura 4 – Contracción del suelo utilizado en la estabilización con cal y polímero

### 5.2. Características de compactación

La determinación de las características de compactación es otra de las propiedades importantes en el estudio de materiales estabilizantes. De esta prueba se determinan el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo que pueden ser los valores de referencia para la preparación de los especímenes. Para el suelo 1, la curva de compactación se determinó con la norma ASTM D 698 (Proctor estándar) y para el suelo 2, se utilizó la norma ASTM D 1557 (Proctor modificada). La Figura 5 muestra las curvas de compactación para el suelo en estado natural.



(a) (b)

Figura 5 – (a) Curvas de compactación del suelo 1;  
(b) Curvas de compactación del suelo 2

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Resultados de para el suelo 1

Las pruebas de compresión simple son una de las utilizadas cuando se requiere evaluar las propiedades de un material estabilizado. De hecho, muchos departamentos de Transporte de los Estados Unidos especifican un valor de resistencia a la compresión simple para controlar la calidad del material compactado. En este inciso se presentan los resultados de las pruebas realizadas en el suelo 1.

Con respecto a la resistencia en compresión simple, se estudiaron tres condiciones como se mencionó anteriormente: suelo en estado natural, suelo estabilizado con cal viva y suelo estabilizado con polímero. Para cada tiempo de curado se realizaron tres pruebas, por ejemplo, la Figura 6 muestra las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas para tres especímenes de suelo natural y un tiempo de curado de 7 días. Como se puede observar, existe buena repetibilidad de los resultados obtenidos de tres especímenes.

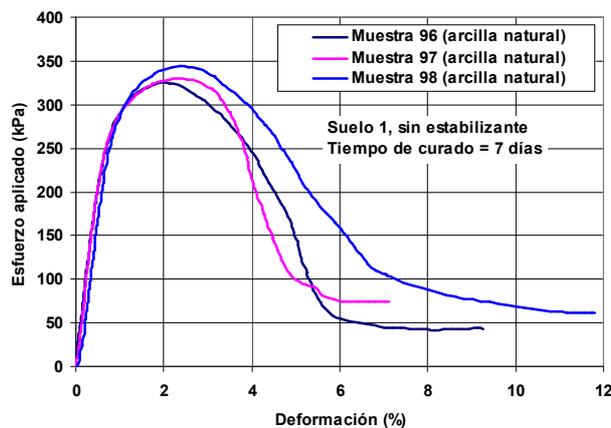


Figura 6 – Curvas esfuerzo-deformación para especímenes de suelo natural con tiempo de curado de 7 días

La Figura 7 muestra el comportamiento de la resistencia a compresión para los diferentes tiempos de curado estudiados. La gráfica indica que los especímenes preparados con IP0232-Perez-S

suelo natural y aquellos estabilizados con polímero presentan un ligero incremento en su resistencia a medida que el tiempo de curado se incrementa, sin embargo, los especímenes estabilizados con cal muestran un incremento rápido en la resistencia para los primeros días de curado y después esta velocidad se reduce. La resistencia que presenta para 28 días de curado es alrededor de 3.5 veces la que se tiene para un tiempo de curado de 0 días (es decir, ensayada inmediatamente después de compactar).

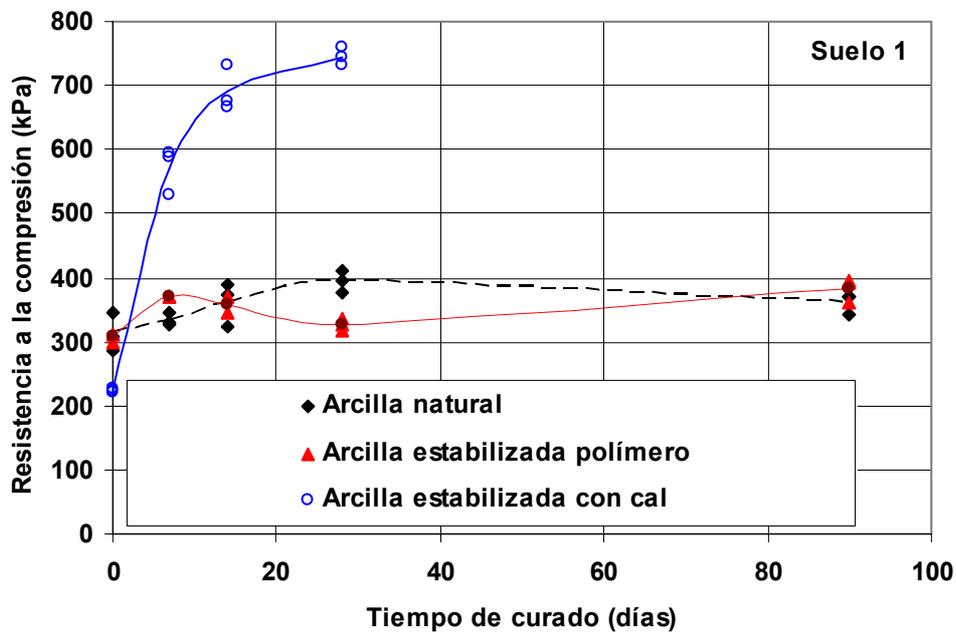


Figura 7 – Curvas esfuerzo-deformación promedio para especímenes en estado natural, estabilizados con polímero y estabilizados con cal

Los datos de CBR mostraron que los especímenes compactados con arcilla natural y un tiempo de curado de 0 días tenían un CBR de 0.6 % con un valor de expansión de 13.1 % y para 90 días de curado el valor de CBR fue de 0.8 % y un valor de expansión de 12.9 %. De acuerdo con estos datos, puede concluirse que el tiempo de curado no tiene efecto en ambos parámetros.

Cuando se estabilizó la arcilla con polímero, los valores de CBR oscilaron entre valores similares a los obtenidos para el suelo en estado natural, de igual forma se observa con los valores de expansión (Tabla 3).

Por otro lado, los datos del material estabilizado con 4 % de cal muestran que los valores de CBR y de la expansión se ven modificados de forma importante, es decir, los valores de CBR se incrementan hasta un valor de aproximadamente 48 % mientras que el suelo en estado natural tenía menos de 1 % de CBR (Figura 8). Por otro lado, la expansión que tenía un valor de entre 12 y 13 % se reduce a valores menores de 1 % (Figura 9). Los datos de todas las pruebas se resumen en la Tabla 4.

Tabla 3 – Valores de CBR y expansión de los especímenes estabilizados con polímero

Muestra No.	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR prom. (%)	Expansión prom. (%)
23	35.5	12.51	0.6	12.5
24	35.6	12.38		
25	36.3	12.36		
17	36.4	12.38	0.6	13.9
18	36.1	12.46		
19	37.5	12.31		
20	36.2	12.37	0.9	13.7
21	36.5	12.35		
22	36.1	12.42		
11	36.7	12.40	0.8	12.4
12	36.5	12.48		
13	36.2	12.45		
14	36.1	12.41	0.9	11.3
15	36.6	12.41		
16	36.0	12.46		

Tabla 4 – Valores de CBR y expansión de los especímenes estabilizados con cal

Muestra No.	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR prom (%)	Expansión prom. (%)
47	40.3	11.20	27.1	0.4
48	40.8	11.27		
49	40.2	11.21		
44	40.1	11.00	45.5	0.02
45	41.0	11.02		
46	40.4	11.04		
41	40.6	11.10	48.9	0.04
42	40.4	11.10		
43	39.6	11.21		
38	40.3	10.91	48.1	0.12
39	39.9	10.96		
40	40.6	10.93		
35	40.5	10.93	48.8	0.15
36	40.5	10.95		
37	40.7	11.02		

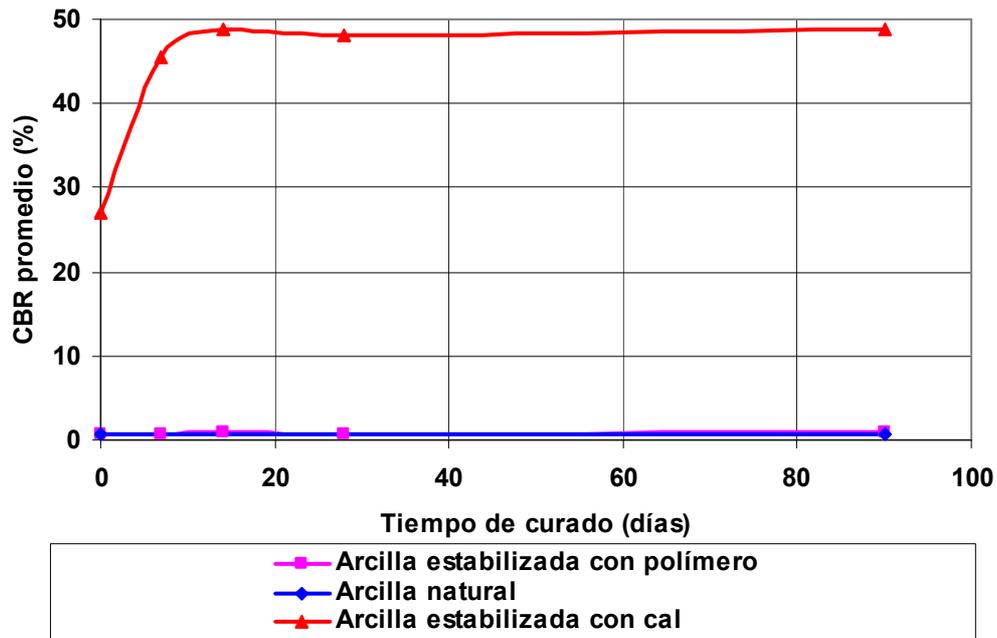


Figura 8 – Comportamiento del valor de CBR con respecto al tiempo de curado

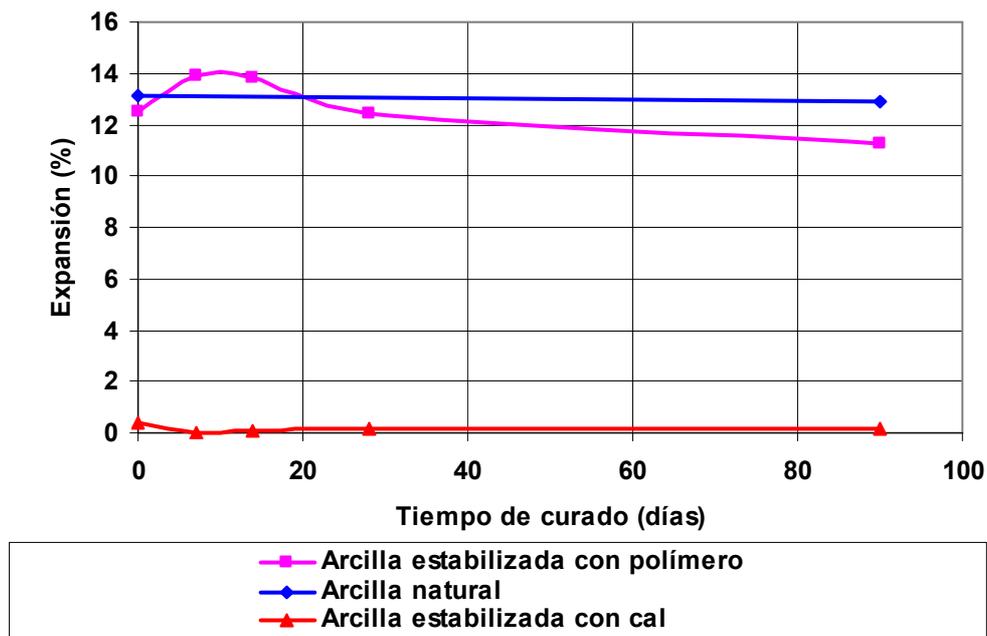


Figura 9 – Comportamiento de la expansión obtenida durante el ensaye de CBR y su variación con respecto al tiempo de curado

El módulo de resiliencia es otro de los parámetros que se reportan en este artículo. En el estudio se desarrollaron dos o tres pruebas para cada condición y el valor reportado es el promedio. Los resultados de esta prueba son 16 valores como lo indica la Figura 10, no obstante, para análisis con respecto al tiempo de curado sólo se toman algunos valores como referencia.

Como se observa en la figura, los resultados son repetibles para dos muestras con condiciones iniciales similares, sólo se tienen diferencias para el primer esfuerzo desviador que es donde quizá la resolución del LVDT no sea la más conveniente.

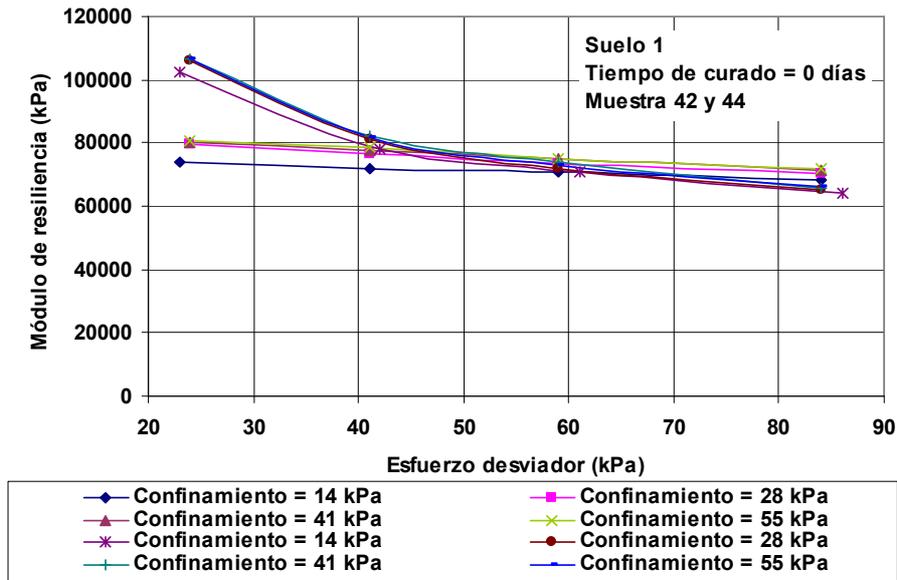


Figura 10 – Pruebas de módulo de resiliencia para el suelo 1.

En la Tabla 5 se resumen las características de los especímenes ensayados tanto en estado natural como los estabilizados con polímero o con la cal.

Tabla 5 – Características de los especímenes ensayados en módulo de resiliencia

Arcilla natural				Arcilla estabilizante con polímero				Arcilla estabilizada con cal			
Muestra No.	curado (días)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Muestra No.	curado (días)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Muestra No.	curado (días)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
42	0	36.2	12.54	55	0	36.4	12.43	112	0	41.3	11.08
44	0	35.9	12.38	56	0	36.0	12.40	113	0	41.3	11.02
99	7	35.8	12.41	64	7	35.7	12.56	106	7	39.9	11.16
101	7	35.8	12.49	65	7	35.1	12.63	107	7	40.0	11.16
88	14	35.1	12.57	26	14	35.5	12.37	93	14	40.2	11.12
89	14	35.9	12.55	27	14	35.7	12.44	94	14	40.1	11.11
69	28	36.3	12.39	18	28	36.4	12.30	84	28	40.7	11.08
71	28	35.9	12.43	19	28	36.5	12.40	85	28	40.7	11.10
51	90	36.6	12.23	4	90	36.4	12.41				
53	90	35.7	12.41	5	90	36.8	12.29				

Si se comparan por ejemplo los valores de módulo de resiliencia para especímenes de suelo natural y los estabilizados con polímero o con cal para un tiempo de curado de 7 días (Figura 11), se puede observar que las curvas de módulos de suelo natural y estabilizadas con polímero no tienen diferencias importantes y se encuentran en el rango de 100 a 150 MPa, sin embargo, los valores de los especímenes estabilizados con cal están muy por encima con valores entre 190 y 270 MPa.

Por otro lado, también se observa que en los especímenes estabilizados con cal el efecto del confinamiento tiene mayor importancia ya que las curvas para cada valor de confinamiento tienen cierto grado de separación, no así las gráficas de probetas con suelo natural o estabilizado con polímero (Figura 11).

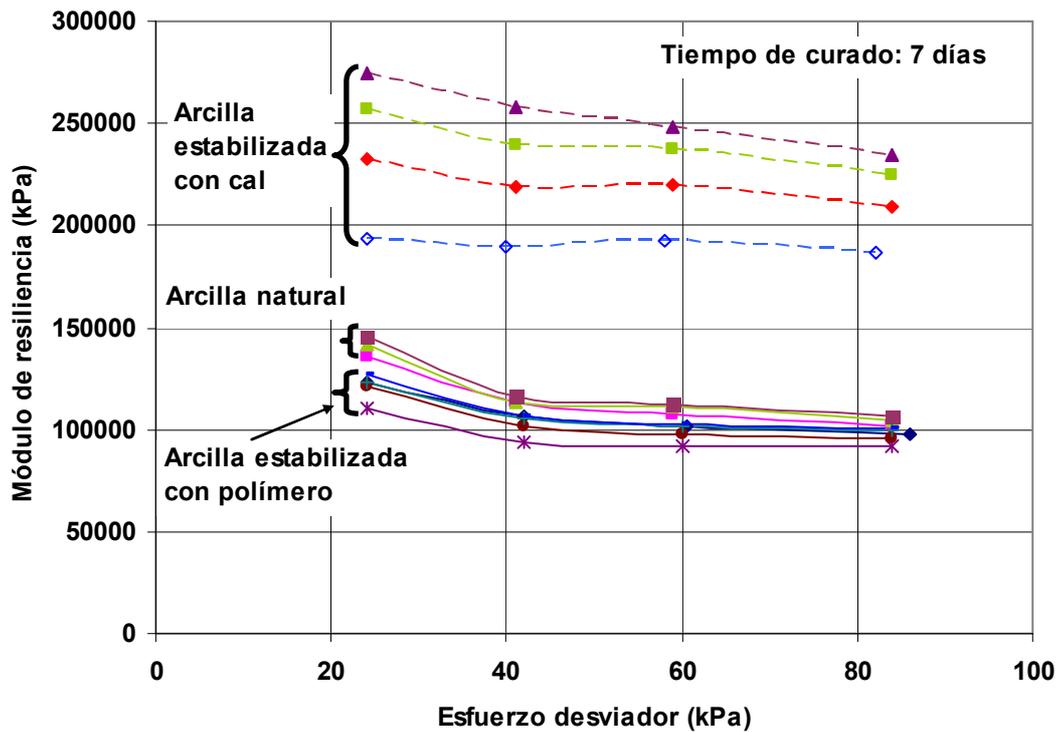


Figura 11 – Pruebas de módulo de resiliencia para el suelo 1. Probetas de suelo natural, estabilizadas con polímero y con cal

Asimismo, si comparamos los módulos de resiliencia para la condición de  $\sigma_d = 84 \text{ kPa}$  y  $\sigma_3 = 14 \text{ kPa}$  pero para todos los tiempos de curado y para las tres condiciones del suelo (natural, estabilizado con polímero y estabilizado con cal), se tiene que de igual manera que sucede con el CBR, el suelo natural y el estabilizado con polímero tienen valores muy similares y en el caso de suelo estabilizado con cal, los valores de módulo se incrementan de forma importante para todos los tiempos de curado excepto para 28 días en donde se reduce a valores cercanos a los iniciales (Figura 12).

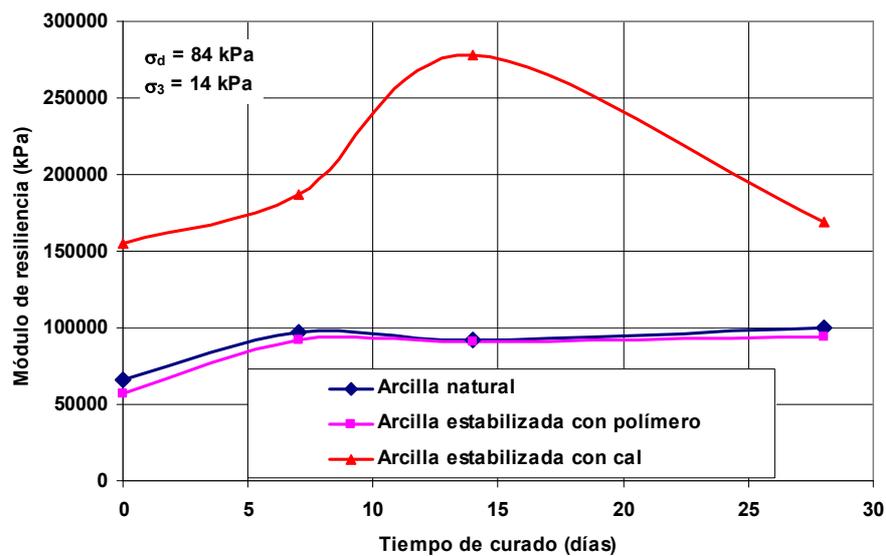
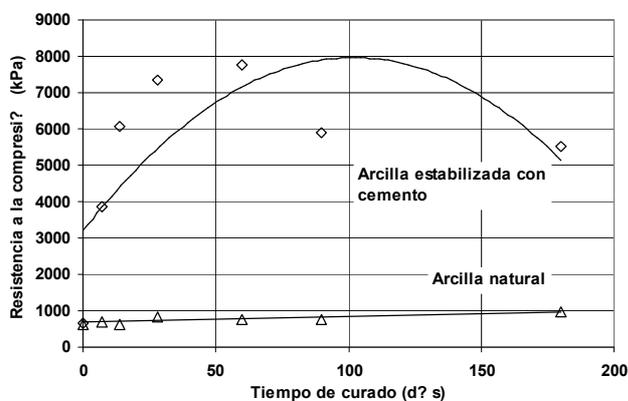


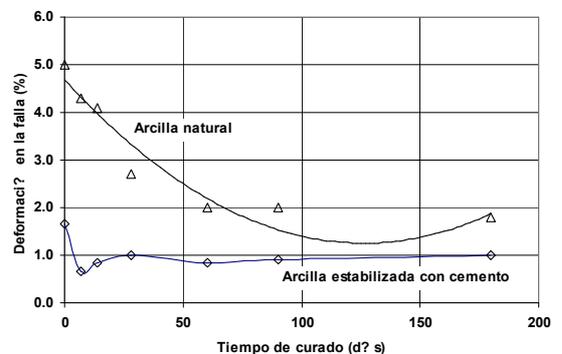
Figura 12 – Variación del módulo de resiliencia con respecto al tiempo para suelo natural, suelo estabilizado con polímero y con cal

## 6.2. Resultados de para el suelo 2

Finalmente, la gráfica de la Figura 13 muestra la comparación del comportamiento de la compresión simple obtenido de la arcilla estabilizada con 8 % de cemento y la arcilla en estado natural. La gráfica de la parte a muestra que la velocidad de incremento en la resistencia es alta en los primeros días de curado, posteriormente esta velocidad se va reduciendo y para tiempos de curado de 90 y 180 la resistencia se reduce; para el suelo natural, la resistencia en compresión simple varía ligeramente con respecto al tiempo de curado y los valores son muy bajos con respecto a lo que se obtiene cuando se estabiliza con cemento. Por otro lado, la deformación en la falla de los especímenes de suelo sin estabilizar se reduce a medida que el tiempo de curado se incrementa y la deformación de los especímenes estabilizados con cemento, el valor para tiempo de curado igual a cero toma un valor aproximado de 1.8 %, lo cual demuestra que la reacción del cemento-suelo-agua es inmediata, sin embargo, a partir de 28 días de curado la deformación en la falla parece ser independiente del tiempo de curado (Figura 13b).



(a)



(b)

Figura 13 – (a) Gráfica de resistencia a compresión simple; (b) Deformación de los especímenes en la falla

La Figura 14a y b muestra los resultados de módulo de resiliencia para todas las secuencias de carga para cero y siete días de curado. En esta figura se nota la gran diferencia en los módulos de resiliencia obtenidos con el material estabilizado con cemento. Los valores del suelo natural tienden a estar entre 100 y 140 MPa, mientras que para las estabilizadas con cemento los valores varían entre 200 y 260 MPa (cero días de curado). Por otro lado, si comparamos las gráficas para un tiempo de curado de siete días se puede obtener la Figura 14b en la que se nota que los módulos de resiliencia de la arcilla natural se incrementaron con respecto a las de 0 días de curado, de igual forma para el suelo-cemento.

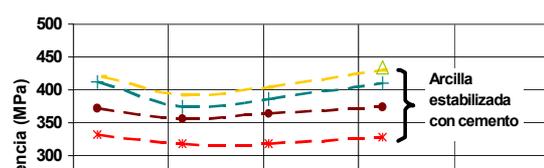
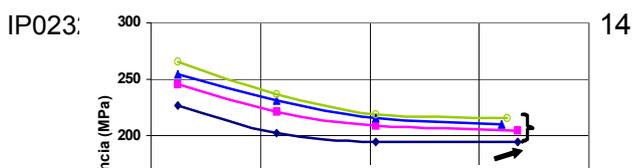


Figura 14 – Resultados de módulo de resiliencia

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten evidenciar la importancia de evaluar los productos estabilizantes que se ofrecen en el mercado. Para el caso del polímero considerado en este estudio, por ejemplo, los resultados obtenidos no demuestran que se mejoren las propiedades de los materiales.

Al mismo tiempo, el trabajo remarca los efectos de agentes estabilizantes típicos como la cal y el cemento con ensayos convencionales como el CBR y la resistencia en compresión no confinada, además, adicionando ensayos más sofisticados como el módulo de resiliencia.

En particular, se muestra que para el suelo tratado con cal, el incremento en el módulo de resiliencia, CBR y resistencia a la compresión sin confinar no es permanente.

## REFERENCES

1. Muñiz, S.J.C. (2006). Las Vías Romanas.
2. Boardman, D.I., Glendinning, S., and Rogers, C.D.F. (2001). Development of soil stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Géotechnique* 50, No. 6, 533-543.
3. Piñero, R.C.S. (2000). Use of high volume fly ash cement for stabilization of expansive soils with high soluble sulfates content. PhD Dissertation. Texas A & M University. December 2000.
4. Little, D.N., Males, E., E. Prusinski, J. and Stewart, B. (?). Cementitious Stabilization. A2J01: Committee on Cementitious Stabilization.
5. Geiman, C.M. (2005). Stabilization of soft clay subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.