

# Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado

Javier Camacho-Tauta\*, Óscar J.Reyes-Ortiz\*\*,  
Catalina Mayorga- Antolínez\*\*\*

---

## Resumen

*La efectividad en la estabilización de arcillas expansivas por medio de aceite sulfonado depende de las condiciones ambientales durante el curado. Se propone analizar especímenes de arcilla sometidos a diferentes períodos de curado natural y, simultáneamente, mediante curado artificial acelerado. La relación entre el tiempo de curado natural y el tiempo equivalente de curado acelerado depende del tipo de material estudiado, las condiciones ambientales del lugar que se desean simular y los parámetros que se consiguen controlar en una cámara de envejecimiento acelerado. Para tal objetivo se llevaron a cabo ensayos de plasticidad de muestras estabilizadas con aceite sulfonado, sometidas a diferentes períodos de curado tanto en condiciones naturales como en una cámara de envejecimiento acelerado. Se obtuvo un factor de curado acelerado para el material estudiado y se encontraron diferencias entre el proceso de curado natural y el curado acelerado.*

**Palabras claves:** Envejecimiento acelerado, estabilización, plasticidad, arcilla expansiva.

Fecha de recepción: 28 de abril de 2008  
Fecha de aceptación: 30 de agosto de 2008

---

\*Ingeniero Civil, M. Sc., profesor asistente, Grupo Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá (Colombia). [jcamacho@umng.edu.co](mailto:jcamacho@umng.edu.co)

\*\*Ingeniero Civil, M. Sc., profesor asociado, Grupo Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá (Colombia). [oreyes@umng.edu.co](mailto:oreyes@umng.edu.co)

\*\*\* Ingeniera Civil, joven investigadora Grupo Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá (Colombia). [catalina.mayorga@umng.edu.co](mailto:catalina.mayorga@umng.edu.co)

Correspondencia: Universidad Militar Nueva Granada Programa de Ingeniería Civil – Grupo Geotecnia Carrera 11 n.º 101-80 Tel: 2757300 ext: 329 Bogotá (Colombia)

Subvenciones y apoyos: Colciencias, Química Cros S.A. y Universidad Militar Nueva Granada (Contrato 484-2005).

## Abstract

The effectiveness in stabilizing expansive clays with sulfonated oil depends on environmental conditions during curing. It is possible to analyze specimens subject to different periods by natural curing or alternatively, by artificial curing. The relationship between the natural curing period and the equivalent accelerated curing period depends on the type of material studied, the environmental conditions of the place to simulate, and the parameters that can be controlled in a chamber of accelerated ageing. Plasticity tests were carried out with clay specimens, subject to different periods of curing both in natural conditions and in a chamber of accelerated ageing. A factor of accelerated curing was obtained and differences between the curing processes were found.

**Key words:** Accelerated aging, stabilization, plasticity, expansive clay.

---

## INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos tienen un comportamiento perjudicial para cualquier estructura construida sobre los mismos, puesto que se expanden y contraen ante la presencia y posterior pérdida de agua. La actividad eléctrica de los cationes que los componen y que crean un enlace electroquímico arcilla-agua, forman una capa de agua en el entorno de cada partícula del material, que ocasiona variaciones volumétricas que inducen esfuerzos adicionales a las estructuras construidas sobre este tipo de arcillas [1].

Estudios previos han analizado suelos expansivos para determinar el comportamiento de las propiedades expansivas ocasionadas por el envejecimiento, sometiendo las muestras compactadas a exposición natural con ciclos de humedecimiento y secado. Se observa que para el primer ciclo de humedecimiento y secado, la cantidad de expansión vertical es pequeña, pero en los posteriores ciclos su magnitud aumenta significativamente [2]. Estos cambios sugieren que es necesario estudiar mayores períodos de exposición para poder encontrar resultados más concluyentes, si se tiene en cuenta que las reacciones fotoquímicas, normalmente, no son reacciones simples de un paso [3].

[4] estudió los efectos del envejecimiento en la expansión y contracción de un suelo expansivo compactado y pudo determinar que los factores dominantes que influyen los efectos del envejecimiento son el contenido de humedad y el grado de saturación al comienzo del proceso de envejecimiento. [5] por su parte afirma que el potencial de expansión de

un suelo está influenciado por dos grupos de factores: el primero depende de la naturaleza de las partículas del suelo y el segundo grupo depende del estado físico y ambiental del suelo, que incluye la densidad seca y el contenido de agua en la compactación.

Los resultados obtenidos por [6] sugieren que las arcillas expansivas pueden ser compactadas hasta lograr la densidad seca óptima si se les da suficiente tiempo para el envejecimiento, porque se observó que para la misma densidad seca, la cantidad de potencial de expansión no es afectada por la humedad inicial.

[7] muestra que el efecto estabilizador del aceite sulfonado sobre una arcilla expansiva, depende de las condiciones ambientales y que se desarrolla a lo largo del tiempo; así se hace necesario estudiar su evolución mediante el análisis de especímenes sometidos a diferentes períodos de curado. Lo anterior hace que un estudio sistemático de este fenómeno, requiera de tiempos excesivos especialmente cuando las condiciones ambientales son las menos propicias para el desarrollo del efecto estabilizador del aceite sulfonado [8].

Las cámaras de envejecimiento acelerado permiten lograr en menor tiempo los cambios que se presentan en un material por una exposición natural prolongada, porque simula condiciones de radiación UV, temperatura y humedad relativa, y a su vez estas pueden ser controladas, garantizando la repetibilidad y evaluación a diferentes tiempos de exposición.

Una cámara de envejecimiento acelerado fue utilizada para estudiar el aceite sulfonado Geo-Stab (Química Cros S.A.) como agente estabilizante de arcillas expansivas. Como parte del estudio fue necesario desarrollar un proceso previo de calibración de la cámara, que consiste en la comparación del proceso de curado en condiciones ambientales naturales y en condiciones de curado artificial del mismo proceso mediante la cámara de envejecimiento acelerado.

## 1. MARCO CONCEPTUAL

### 1.1. Estabilización electroquímica

Los aceites sulfonados son agentes catalizadores que producen intercambio de iones; químicamente son compuestos orgánicos derivados de sulfuros y ácidos combinados. La función más importante de estos aceites es la reducción del agua contenida entre las partículas del suelo, aumentando el número de vacíos que permiten el reacomodamiento de las partículas, bien sea por atracción entre ellas o bien por compactación [9].

El aceite sulfonado es un líquido soluble en agua, a la que ioniza aumentando su conductividad y facilitando el intercambio catiónico, ya que la obliga a desprenderse de las partículas de arcilla y la convierte en agua libre, capaz de intercambiar sus cargas eléctricas con los cationes de la arcilla, a los que finalmente neutraliza y obliga en forma permanente a perder su avidez de agua.

Los principales efectos que tiene el aceite sulfonado sobre los suelos de matriz arcillosa son: reduce espacios intersticiales, reduce la permeabilidad, incrementa la sedimentación, mejora la respuesta a la compactación y aumenta la densidad del suelo. Los estudios realizados con aceites sulfonados y la evidencia obtenida mediante ensayos realizados en campo, muestran que el sistema de estabilización electroquímica es una alternativa competitiva para disminuir el potencial expansivo de los suelos arcillosos.

### 1.2. Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas. La medición de la radiación solar que se realiza en forma instantánea como el cociente entre la cantidad de energía solar incidente en la unidad de área se denomina irradiancia (I):

$$I = \frac{\text{energía}}{\text{área}} \quad (1)$$

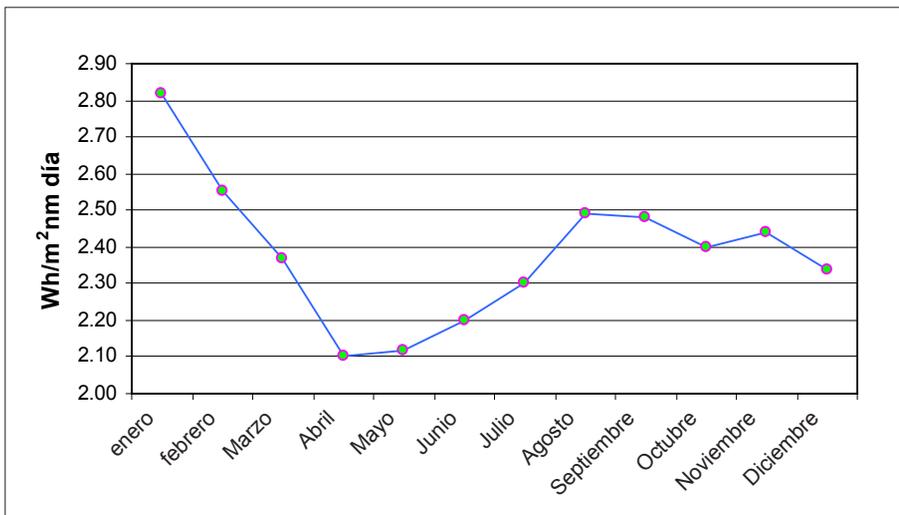
o integrada durante un lapso de tiempo que normalmente es un día, irradiación (H) [10], [11].

$$H = \frac{\text{energía}}{\text{área}} \cdot \text{tiempo} \quad (2)$$

La cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre depende de factores como la capa de ozono, hora del día, época del año, altitud, latitud y condiciones climáticas de la región. A su vez, aquella se encuentra categorizada en grupos que cubren una amplia gama de longitudes de ondas que no poseen límites precisos.

La luz ultravioleta (UV) constituye una parte del espectro electromagnético; tiene longitudes de onda entre 380 y 10 nanómetros; y se subdivide en tres bandas (UVC, UVB y UVA) en donde las últimas son las menos perjudiciales y del tipo más común de luz UV [12]. Adicionalmente, esta fracción del espectro es la causante por el deterioro de los materiales en ingeniería debido a su efecto catalizador de las reacciones químicas que producen la transformación de los materiales.

La radiación UV en la ciudad de Bogotá es reportada por el IDEAM [13]. En la figura 1 se presentan los valores promedio mensual de radiación UV-340nm para Bogotá.



Fuente: IDEAM.

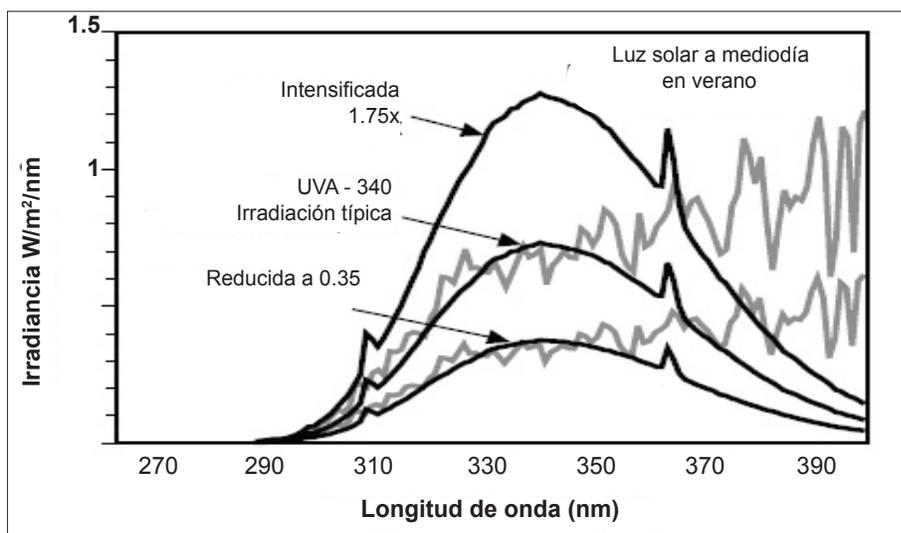
**Figura 1.** Promedio mensual de la radiación UV-A integrada día en el canal 340 nm

### 1.3. Simulación de la radiación uv

Una cámara de envejecimiento acelerado permite simular el efecto de la radiación UV. Este tipo de cámara utiliza lámparas UVA-340 porque son la mejor simulación de onda corta de la luz solar, [14]. Estas lámparas no tienen componentes inferiores a los 300 nm y permiten una adecuada correlación con las reales condiciones de campo, de acuerdo con la norma ASTM G 154-06 [15].

En la cámara se programan ciclos de radiación y de oscuridad, que simulan los períodos de tiempo reales sin la incidencia de la radiación solar; aunque esta no es constante durante todo el día, se utilizan valores promedios mensuales suministrados por el IDEAM, que se comparan con la radiación total acumulada artificial.

En la figura 2 se presenta el espectro típico de la luz solar y se compara con el espectro producido por una lámpara UVA-340 [15]. La irradiancia es establecida ajustando la potencia de salida del equipo y es controlada mediante un radiómetro instalado dentro del mismo para verificar que la magnitud seleccionada es efectivamente la utilizada durante el período de exposición.



Fuente: Q-Lab Corporation.

**Figura 2.** Distribución de la radiación UVA a diferentes intensidades

Teóricamente se puede determinar el tiempo necesario de exposición en cámara que simule una cantidad de irradiación total correspondiente a la recibida en campo. Por ejemplo, la irradiación total acumulada a lo largo de los meses de marzo, abril y mayo se puede calcular así:

$$\begin{aligned}
 IR = & 2.37 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot nm \cdot día} \cdot 31 \text{ día} + 2.10 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot nm \cdot día} \cdot 30 \text{ día} + \\
 & 2.12 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot nm \cdot día} \cdot 31 \text{ día} = 202.2 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot nm}
 \end{aligned} \tag{3}$$

La irradiancia aplicada mediante la cámara de envejecimiento acelerado es igual a 1.6 W/m<sup>2</sup>.nm a 340 nm. Por consiguiente, para conseguir la misma irradiación total acumulada se requiere de un tiempo acumulado en cámara (ta) de:

$$ta = \frac{202.2 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot nm}}{1.6 \frac{W}{m^2 \cdot nm}} = 126.4h \tag{4}$$

Así, la relación (k) entre el tiempo en campo (tc) y el tiempo en cámara (ta) que corresponde a la misma irradiancia, para este período de tiempo (marzo, abril y mayo) puede encontrarse también:

$$k = \frac{92 \text{ día} \cdot \frac{12 \text{ horas de sol}}{\text{día}}}{126.4 \text{ horas en cámara}} = 8.73 \tag{5}$$

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se analizó una arcilla de potencial de expansión marginal, que se obtuvo mezclando bentonita y caolín en las concentraciones en peso que se muestran en la tabla 1. Posteriormente, se le adicionó aceite sulfonado (disuelto en agua) en concentraciones de 25, 50 y 100 cc/m<sup>3</sup> de material mezclado.

**Tabla 1**  
Concentraciones y caracterización inicial de la arcilla utilizada.

<b>Bentonita (%)</b>	<b>Caolín (%)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>
6	94	49	31	1.83	16.50

### 2.1. Preparación de las muestras para el curado a exposición natural

Se mezclaron las muestras con las concentraciones de aceite sulfonado disueltas en la cantidad de agua correspondiente a la humedad óptima obtenida del ensayo de compactación proctor modificado (ASTM D 698), realizado previamente. Las muestras se sometieron a un proceso de curado a exposición natural de 30, 60, 90 y 120 días. Las condiciones ambientales medias en la ciudad de Bogotá son:

**Tabla 2**  
Valores promedio de variables del clima para Bogotá. IDEAM [13]

<b>Parámetro</b>	<b>Valor medio</b>
Temperatura (°C)	19
Humedad relativa (%)	77
Radiación UVA media anual (Wh/m <sup>2</sup> nm día)	2.38
Radiación solar global multianual (kWh/m <sup>2</sup> )	4.5

## 2.2. Preparación de las muestras para el curado en cámara

Se prepararon muestras según una humedad óptima y peso unitario seco máximo de acuerdo con el ensayo de compactación normal (ASTMD 698), en un molde de 7,8 cm de diámetro y 15 cm de altura, para cada concentración de aceite sulfonado y tiempo de curado. Las muestras se expusieron a ciclos continuos de ocho horas de radiación UV-1.60 W/m<sup>2</sup> y de cuatro horas de condensación, para ser ensayadas a diferentes períodos de curado.

## 2.3. Ensayos realizados

Cada muestra al cumplir el tiempo de curado previsto, tanto a exposición natural como en cámara, fue pulverizada y sometida a ensayos de plasticidad: límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) (INV E-125, E-126, E-127), que permiten estimar el potencial expansivo del suelo (ver tabla 2) y pueden ser utilizados como parámetro para establecer la correlación entre ambos sistemas de curado.

**Tabla 3**  
Potencial expansivo del suelo. Norma INVÍAS E-132

<b>Grado de expansión</b>	<b>LL%</b>	<b>IP %</b>	<b><math>\tau_{nat}</math> (Ton/pie<sup>2</sup>)</b>
Elevado	>60	<35	>4
Marginal	50-60	25-35	1.5-4
Bajo	<50	<25	<1.5

## 2.4. Comparación entre los dos tipos de envejecimiento

Para comparar los dos tipos de envejecimiento se utilizó un modelo de variación lineal para cada uno, teniendo en cuenta que los datos igualmente espaciados no permiten un buen ajuste de un modelo diferente.

Al igualar ambos modelos se encuentra la relación entre los dos así:

- Regresión lineal datos de campo:

$$LL = mc \cdot tc + bc \quad (8)$$

Donde:

*LL*     límite líquido  
*mc*     pendiente campo  
*tc*     tiempo (días) campo  
*bc*     intercepto campo

- Regresión lineal datos de cámara:

$$LL = ma \cdot ta + ba \quad (9)$$

Donde:

*LL*     límite líquido  
*mc*     pendiente cámara.  
*tc*     tiempo (días) cámara.  
*bc*     intercepto cámara.

Se encontró que el proceso de envejecimiento acelerado produce una alteración inicial y constante en los valores de plasticidad; para corregir este efecto, a la curva de la cámara se le restó la diferencia de los interceptos, obteniendo así la recta corregida de cámara (*LL'*):

$$\begin{aligned} LL' &= LL - (ba - bc) \\ LL' &= ma \cdot ta + ba - (ba - bc) \\ LL' &= ma \cdot ta - bc \end{aligned} \quad (10)$$

Finalmente la constante de calibración es la relación entre la pendiente obtenida en cámara con la obtenida en campo y la corrección se hará restando al valor de límite líquido o índice de plasticidad respectivamente, el valor correspondiente a la diferencia entre los interceptos.

$$\begin{aligned} LL' &= LL \\ ma \cdot ta - bc &= mc \cdot tc + bc \\ ma/mc &= k = tc/ta \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las figuras 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos con los tiempos en cámara correlacionados con el factor (k) previamente hallado. Se observa que los valores obtenidos para el límite líquido a los 120 días de curado en campo (1440 horas de sol), para las tres concentraciones no difieren mucho entre sí, pero permiten corroborar que existe una reacción favorable en el tiempo. Igualmente si se analiza el comportamiento del índice de plasticidad, se observa una tendencia general en la disminución de este índice.

Las pendientes medias de las curvas de campo son muy similares entre sí, tanto para el caso de la variación del límite líquido como para el índice de plasticidad. Esto sugiere que en campo la dosificación utilizada no afecta sustancialmente la velocidad con que se produce el curado.

Los resultados obtenidos del curado en cámara para las tres concentraciones de aceite sulfonado, tanto para el límite líquido como para el índice de plasticidad, muestran un aumento inicial seguido de una posterior disminución. Este efecto puede deberse a que en la cámara de envejecimiento acelerado no se puede controlar totalmente el efecto de la temperatura generada por las lámparas.

Por otra parte, el proceso de curado acelerado presenta evidencias de una dependencia entre la dosificación utilizada y la velocidad de estabilización, en donde a mayor dosificación, menor es la pendiente obtenida. Los datos en la tabla 4 señalan que las pendientes para las muestras curadas en campo son iguales, mientras que las pendientes curadas en cámara registran la tendencia señalada.

Analizando las constantes de calibración (k) obtenidas en la tabla 4, se puede observar que estas difieren para cada parámetro de evaluación y para la misma concentración. Así mismo, estos valores difieren del valor teóricamente obtenido, por lo que el proceso de curado en cámara puede requerir entre 1.7 a 3.6 veces el valor inicialmente estimado para el tipo de arcilla y dosificaciones estudiadas. Si se evalúan las constantes de calibración para el límite líquido, utilizando la fórmula (10), se puede deducir que para obtener el valor del límite líquido obtenido en campo a un número determinado de días basta con dividir ese tiempo entre el factor (k) obtenido. Si el valor de (k) disminuye, el tiempo que se requiere en cámara debe ser mayor. Por lo tanto, entre mayor es la dosificación de aceite sulfonado, menos acelerado es el proceso de envejecimiento.

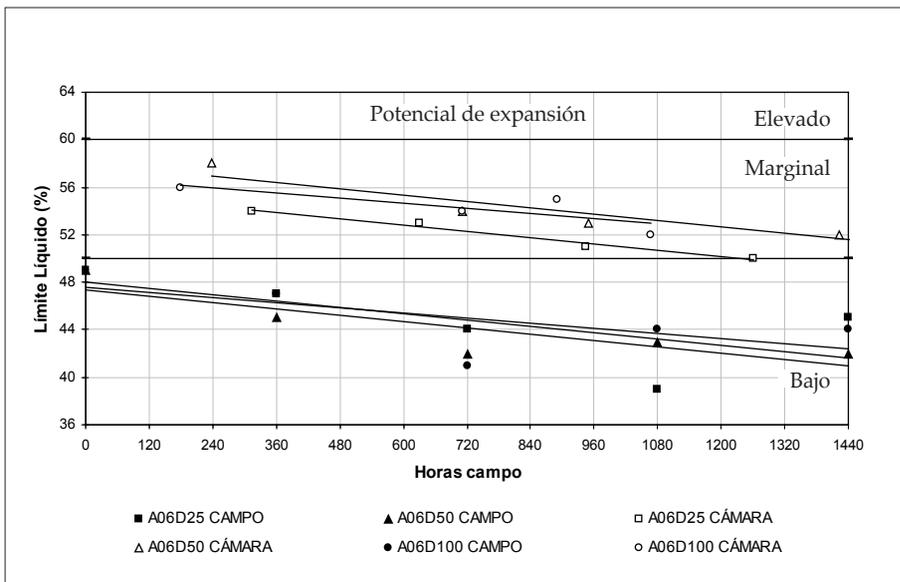


Figura 3. Variación del límite líquido de muestras curadas en campo y en cámara

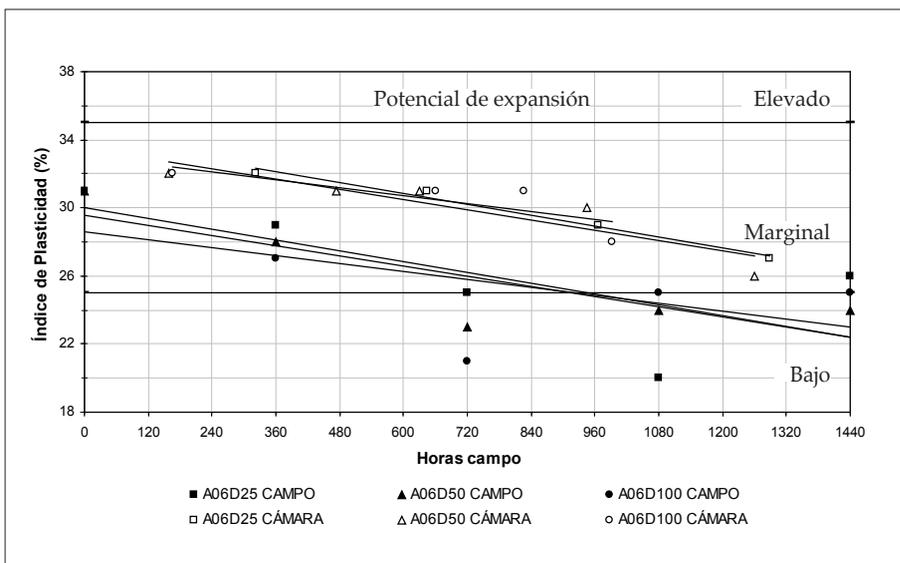


Figura 4. Variación del índice de plasticidad de muestras curadas en campo y en cámara

**Tabla 4**  
Pendientes e interceptos para el curado en campo y en cámara

Parámetro	Límite líquido					Índice de plasticidad				
	k	mc	ma	bc	ba	k	mc	ma	bc	ba
Dosificación Aceite sulfonado (cc/m <sup>3</sup> )										
25	4.92	-0.004	-0.022	48	56	5.03	-0.005	-0.027	30	34
50	3.71	-0.004	-0.016	47	58	2.46	-0.005	-0.012	30	34
100	2.78	-0.004	-0.010	48	57	2.58	-0.004	-0.010	29	33

Así mismo, es evidente que entre mayor es la dosificación de estabilizante, así, igualmente, es la tendencia a coincidir dado en los estimativos de la constante de calibración obtenidos con la variación del límite líquido y con el índice de plasticidad, respectivamente. El efecto colateral del proceso de curado acelerado sobre la plasticidad inicial es menos pronunciado cuando se analiza el proceso mediante el índice de plasticidad que cuando se analiza el límite líquido únicamente. Esto se debe a que el índice de plasticidad depende del límite líquido y del límite plástico, y que las muestras tratadas presentan un aumento en el valor del límite plástico; por ende, el índice de plasticidad, que es la diferencia de estos, es menor.

#### 4. CONCLUSIONES

Se simuló el proceso de curado natural de una arcilla estabilizada mediante aceite sulfonado, utilizando una cámara de envejecimiento acelerado cuya emisión de radiación UV actúa como acelerador de los procesos electroquímicos que se llevan a cabo entre el estabilizante, la arcilla y el agua intersticial. Este procedimiento puede servir para simular largos períodos de curado, y estudiar tratamientos de estabilización y su efecto a largo plazo.

El proceso de curado analizado evidenció que existe una tendencia a la disminución de la plasticidad de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado cuando es sometida a un proceso de curado bajo condiciones ambientales que permitan el desarrollo del proceso electroquímico.

El curado en cámara aumentó inicialmente la plasticidad de la arcilla, aunque a partir del cuarto día comenzó a reducirla; este efecto inicial, que debe ser

detalladamente estudiado, posiblemente está asociado al efecto de la temperatura, la cual no puede ser totalmente independizada de la radiación UV en la cámara de envejecimiento acelerado. El índice de plasticidad puede ser un mejor indicador para comparar los dos procesos de curado, puesto que este experimentó un menor aumento inicial.

Para las concentraciones de estabilizante estudiadas, se encontró que a mayor dosificación de aceite sulfonado, menor es la constante de calibración entre los procesos de curado natural y acelerado; y en consecuencia, se requiere mayor tiempo de curado en cámara.

### Agradecimientos

El presente trabajo se realizó dentro del proyecto de investigación denominado "Optimización del uso de Geo-Stab y metodología para su evaluación" desarrollado por el Grupo de Investigación en Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada y financiado por Colciencias, y Química Cros S.A. (Contrato 484-2005).

### REFERENCIAS

- [1] Química Cros, en: <http://www.acresquim.com/geoproblem.htm>
- [2] DAY, R. FELLOW, "Swell-shrink behavior of compacted clay," *Journal of the Soil Foundations and Mechanics Division, ASCE*, vol. 120, n.º 3, pp. 618-623, 1994.
- [3] GADOMSKI, K. "Envejecimiento acelerado", presented at Tecsud Ltda. Conf., 2007.
- [4] SUBBA RAO, K.S. and TRIPATHY S. "Effect of aging on swelling and swell-shrink behavior of a compacted expansive soil," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 26, n.º 1, pp. 36-45, 2003.
- [5] MISHRA, S. DHAWAN and RAO, S. "Analysis of swelling and shrinkage behavior of compacted clays," *Geotechnical and Geological Engineering*, DOI 10.1007/s10706-007-9165-0, 2007.
- [6] KASSIFF, G. and BAKER, R. "Aging effects on swell potential of compacted clay," *Journal of the Soil Foundations and Mechanics Division, ASCE*, vol. 97, n.º 3, pp. 529-540, 1971.
- [7] ARELLANA, J. *Evaluación del efecto de la cal y el geostab en la estabilización de suelos arcillosos en Juan Mina; Barranquilla*, 2004, 172 p.; il. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad del Norte; Facultad de Ingeniería Civil.
- [8] CAMACHO, J., REYES, O., MAYORGA, C. and MÉNDEZ, D. "Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 16, n.º 2, pp. 45-53, 2006.

- [9] PÁEZ, D. "Efectos de la estabilización electroquímica de suelos finos," *Revista Ingeniería UPTC*, vol. 18, n.º 1, pp. 83-96, 2005.
- [10] Unidad de Planeación Minero Energética UPME e Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, "Atlas de radiación solar de Colombia", 2005.
- [11] RODRÍGUEZ, H. and F. GONZÁLEZ. "Manual de radiación en Colombia," H. Rodríguez & F. González, Editores, vol. II, 1994.
- [12] RYER, A. "The Light Measurement Handbook", Technical Publications Dept, International Light, Inc. ISBN 0-9658356-9-3.
- [13] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), "Radiación", en: <http://www.ideam.gov.co/radiacion.htm>
- [14] Q-Lab Corporation, "Boletín Técnico LU-8031.SP", en: <http://www.q-lab.com>
- [15] American Society For Testing And Materials, "Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials," G 154-06, 2006.