

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ARCILLAS SOMETIDAS A DIFERENTES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS

HUGO ALEXÁNDER RONDÓN*

RESUMEN

El artículo presenta el cambio que experimentan dos arcillas en sus propiedades índice, de expansión y resistencia a la compresión inconfiada cuando se someten a altas temperaturas (150, 225 y 300 °C) durante tres tiempos de exposición (1, 7 y 15 días). Además se estudió si las arcillas recuperan las propiedades mencionadas después de ser sometidas a altas temperaturas y de ser nuevamente expuestas a la temperatura ambiente durante una semana en el laboratorio. El objetivo general de la investigación es evaluar si la aplicación de temperatura puede utilizarse como mecanismo de estabilización de arcillas o fabricación de llenante mineral. Los resultados muestran que la plasticidad, el potencial de expansión y la resistencia a la compresión simple de las arcillas ensayadas disminuyen cuando se eleva la temperatura de las muestras entre 150 °C y 300 °C y se incrementa el tiempo de exposición. También se encontró que la recuperación de las propiedades de las arcillas es nula cuando se someten a 300 °C durante 15 días.

PALABRAS CLAVE: temperatura; arcillas expansivas; estabilización; propiedades índice.

BEHAVIOR EVALUATION OF CLAYS SUBJECTED TO DIFFERENT EXPOSURES TIMES AT HIGH TEMPERATURES

ABSTRACT

Laboratory tests were performed in order to evaluate the effects on the index properties, volumetric behavior and monotonic uniaxial strength of two clays caused by the application of different temperatures (150, 225 and 300 °C) for varying periods of time (1, 7 and 15 days). Additionally, we studied whether the clays recover the mentioned properties after being subjected to high temperatures and being again exposed to room temperature

* Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil; Doctor en Ingeniería. Profesor Asistente, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. harondonq@udistrital.edu.co

for one week in the laboratory. The main objective of this research project is to evaluate whether the application of increasing temperatures in clays can be a good stabilization method in the future or if it is possible to produce mineral filler. Results show that the plasticity, expansion potential and monotonic uniaxial strength decrease when the temperature is raised up 150-300 °C on the samples and when the exposure time increased. Additionally, it is reported that the recovery of clay properties is zero when they are subjected to 300 °C for 15 days.

KEY WORDS: temperature; expansive clays; stabilization; index properties.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGILAS SUBMETIDAS A DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

RESUMO

O artigo apresenta a mudança que experimentam duas argilas em suas propriedades índice, de expansão e resistência à compressão não confinada quando se submetem a altas temperaturas (150, 225 e 300 °C) durante três tempos de exposição (1,7 e 15 dias). Ademais estudou-se se as argilas recuperam as propriedades mencionadas, após ser submetidas a altas temperaturas e de ser novamente expostas à temperatura ambiente durante uma semana no laboratório. O objetivo geral da pesquisa é avaliar se a aplicação de temperatura pode ser utilizada como mecanismo de estabilização de argilas ou fabricação de filler mineral. Os resultados mostram que a plasticidade, o potencial de expansão e a resistência à compressão simples das argilas ensaiadas diminuem quando se eleva a temperatura das mostras entre 150 °C e 300 °C e se incrementa o tempo de exposição. Também se encontrou que a recuperação das propriedades das argilas é nula quando se submetem a 300 °C durante 15 dias.

PALAVRAS-CHAVE: temperatura; argilas expansivas; estabilização; propriedades índice.

1. INTRODUCCIÓN

Diversos investigadores en el mundo han emprendido estudios sobre el efecto del calentamiento de las arcillas. Farag (1993) y Varlakou *et al.* (1997) ejecutaron estudios aplicando calor para realizar tratamiento de suelos contaminados. Mitchell (1969) menciona que el calentamiento de arcillas genera cambios en el ángulo de fricción interno, en la cohesión y, por lo tanto, en la resistencia. Joshi *et al.* (1994), Abu-Zweig, Al-Akhras y Attom (2001) y Tan, Yilmaz y Zaimoğlu (2004) estudiaron el efecto, sobre las propiedades físicas y de resistencia bajo carga monotónica, de aplicar calor a arcillas de 300 a 700 °C, de 100 a 400 °C y de 100 a 1000 °C respectivamente. Por lo general, los estudios mencionados sometieron las muestras de arcilla a altas temperaturas alrededor

de un día. El presente estudio, a diferencia de los mencionados, evalúa el efecto de la temperatura sobre dos tipos de arcillas durante tres periodos diferentes (1, 7 y 15 días). El objetivo principal de la mayor parte de estos estudios ha sido medir el cambio que experimentan las propiedades físicas y mecánicas de materiales arcillosos con la temperatura, a fin de evaluar si dichos cambios mejoran el comportamiento de estos materiales cuando se usan como suelos de cimentación de estructuras (p. ej., edificaciones, pavimentos, etc.).

Por lo general, en campo, algunas propiedades indeseables que experimentan estos materiales son: i) cambios volumétricos en presencia o ausencia de agua (expansión y contracción respectivamente); ii) pérdida de capacidad portante y resistencia al corte cuando se incrementa el contenido de agua (humedad).



En los estudios mencionados no se ha medido en laboratorio si las propiedades de las arcillas analizadas, que cambian con la temperatura, vuelven a recuperarse después de ser nuevamente humedecidas y remoldeadas (fenómeno de tixotropía). En este estudio se evaluará si las arcillas analizadas tienen la capacidad de recuperar sus propiedades índice y de resistencia luego de ser sometidas durante 1, 7 y 15 días a temperaturas entre 150 y 300 °C. El presente estudio se ejecutó con el fin de evaluar si la aplicación de temperatura a suelos arcillosos podría ser en el futuro una alternativa de mejoramiento de las propiedades de estos materiales *in situ* (método de estabilización de suelos). Así mismo para evaluar la posible utilización de estos materiales como llenantes minerales no plásticos y no cohesivos de difícil obtención y explotación en canteras. Las técnicas de estabilización de suelos actuales y más empleadas son las mecánicas (compactación, sobrecargas, utilización de fibras, retiro y sustitución de suelos, etc.) y químicas (mezcla con cal, cemento hidráulico, emulsiones asfálticas, asfalto espumado, aceite sulfonado, sulfatos, cloruros, enzimas y cenizas volantes, entre otros). Algunos estudios sobre el tema pueden ser consultados en Angarita y Díaz (1995), Delgado y Suárez (2000), Celedón

y Lazcano (2001), Alvarado y Torres (2002), Arias (2002), Díez y Montes (2002), Garnica *et al.* (2002), Pinzón (2002), NLA (2004) y Merchán (2007). Estas investigaciones han buscado ante todo encontrar los porcentajes óptimos de material estabilizante que se debe agregar a un determinado tipo de suelo para mejorar una característica en particular, por lo general, su resistencia al corte y disminuir el grado de susceptibilidad al cambio volumétrico.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Las arcillas utilizadas para el desarrollo de la investigación provienen de la Sabana de Bogotá (Colombia) y serán denominadas como arcilla 1 y 2 a partir de este momento. La arcilla 2 fue construida a partir de la arcilla 1 reemplazando el 25 % de su masa por bentonita, con el fin de aumentar su potencial de expansión. La mezcla de ambas arcillas se realizó con los materiales inicialmente secados al aire. La arcilla 1 tiene un color café oscuro con tonos grises y se clasifica como CH (arcilla de alta plasticidad) de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS por sus siglas en inglés). En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos típicos que se realizaron para caracterizar las arcillas.

Tabla 1. Resultados de ensayos de caracterización de las arcillas

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor	
			Arcilla 1	Arcilla 2
Humedad natural	w_n	%	51	-
Límite líquido	LL	%	76	151
Límite plástico	LP	%	37,2	56,45
Índice de plasticidad	IP	%	38,8	94,6
Límite de contracción	LC	%	28,2	21,5
Gravedad específica	Gs	-	2,66	2,68
Fracción de arcilla (<0,002 mm)	C	%	54	-
Actividad	A	-	0,52	-

Con el fin de evaluar la capacidad de cambio volumétrico de las arcillas en presencia de agua, se realizaron ensayos para medir el índice de hinchamiento y la expansión libre y en consolidómetro (aplicando una presión vertical de 7 kPa). Adicionalmente se hicieron ensayos de compresión inconfínada, con el fin de evaluar su resistencia uniaxial bajo carga monotónica q_u (tabla 2).

Para evaluar la influencia de la temperatura sobre el comportamiento de las arcillas se hicieron dos tipos de experimentos (fases):

- *Fase 1.* El objetivo de esta fase experimental era evaluar el cambio que sufren las propiedades expansivas de las arcillas cuando se someten a tres temperaturas y tiempos de exposición diferentes. Para tal fin fueron ejecutados ensayos para evaluar IP, LC, q_u , índice de hinchamiento, expansión libre y en consolidómetro. Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo los pasos exigidos por la especificación del Instituto Nacional de Vías (2007). Las muestras para estos ensayos se calentaban en un horno de laboratorio hasta obtener una temperatura de 150, 225 y 300 °C. Bajo estas temperaturas (constantes) las muestras eran sometidas durante 1, 7 y 15 días. Luego de que las muestras se habían sometido a las temperaturas y tiempos de exposición mencionados, eran sacadas del horno hasta alcanzar la temperatura ambiente y luego se ejecutaban los ensayos.
- Para la realización de los ensayos se tomaron muestras inalteradas y alteradas. Las muestras inalteradas de arcilla 1 fueron extraídas con un equipo de perforación manual y empleadas para los ensayos de compresión inconfínada. Las muestras de arcilla 2 fueron fabricadas compactándolas de tal manera que se obtuviera la misma densidad-humedad de la arcilla 1 y utilizando un equipo Harvard Miniatura.
- *Fase 2.* Las arcillas remoldeadas y alteradas tienden a recuperar parte de sus propiedades con el tiempo (fenómeno de tixotropía). En una segunda fase experimental se evaluó si, luego de ser sometidas las arcillas a las temperaturas y tiempos de exposición de la fase 1, eran capaces de recuperar algunas propiedades expansivas luego de una semana en reposo en el laboratorio. En esta fase, las muestras de arcillas fueron humedecidas y remoldeadas luego de ser sometidas a las temperaturas y tiempo de exposición mencionados en la fase 1, y después de una semana, sobre estas muestras se evaluaron propiedades índice, de expansión y resistencia a la compresión inconfínada, con el fin de medir si las arcillas recuperaban sus propiedades iniciales.

Tabla 2. Resultados de ensayos para evaluar potencial de cambio volumétrico y resistencia bajo compresión inconfínada de las arcillas

Parámetro	Unidad	Valor	
		Arcilla 1	Arcilla 2
Índice de hinchamiento	MPa	0,0188	0,0756
Expansión libre	%	55	115
Expansión en consolidómetro	%	12	28
Compresión inconfínada	MPa	0,177	0,073



3. RESULTADOS

3.1 Índices de consistencia

En las figuras 1 y 2 se presenta la evolución del índice de plasticidad (IP) y del límite de contracción (LC) de las arcillas 1 y 2. En los dos materiales estudiados, cuando se incrementa la temperatura se reduce el índice de plasticidad y aumenta la contracción. La mayor disminución del IP (91,4 % y 93,2 % para las arcillas 1 y 2 respectivamente) e incremento del LC (53,2 % y 100 % para las arcillas 1 y 2 respectivamente) se presenta cuando se someten las muestras a una temperatura de 300 °C durante 15 días. La disminución del IP y el incremento del LC se calculan con base en las ecuaciones 1 y 2.

$$\Delta IP = \frac{IP_o - IP(T,t)}{IP_o} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta LC = \frac{LC_o - LC(T,t)}{LC_o} \times 100 \quad (2)$$

ΔIP y ΔLC son el cambio que experimentan el índice de plasticidad IP y el límite de contracción LC respectivamente. IP_o , LC_o son el estado inicial del IP y el LC de las arcillas cuando aún no han recibido temperatura T (en °C) ni tiempos de exposición t (en días). $IP(T, t)$ y $LC(T, t)$ son el IP y el LC para una temperatura T y tiempo de exposición t determinados.

Las figuras 3a, 3b, 3c, 4a, 4b y 4c presentan la disminución del IP que experimentaron las arcillas 1 y 2, con respecto al valor inicial, cuando se elevó la temperatura desde 17 °C hasta 300 °C (fase 1 explicada en la sección 2). Así mismo se observa que al ser sometidas, luego del calentamiento, a un proceso de humedecimiento durante una semana (fase 2), la recuperación de las propiedades de plasticidad es mayor en la arcilla 2. En ambas arcillas, el efecto de recuperación es casi nulo cuando se someten a 300 °C durante 15 días. Un día de sometimiento de las arcillas a temperaturas entre 150 a 300 °C no genera cambios sustanciales en la disminución de la plasticidad de las muestras. Además, con este tiempo de exposición, las muestras recuperan gran parte de la plasticidad cuando se rehumedecen y remoldean durante una semana.

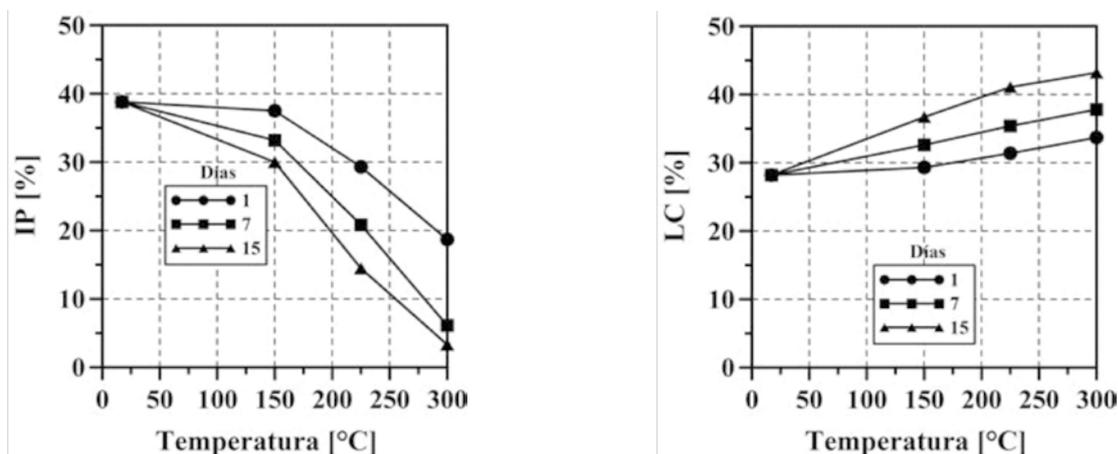


Figura 1. Evolución del IP y LC cuando se somete la arcilla 1 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición

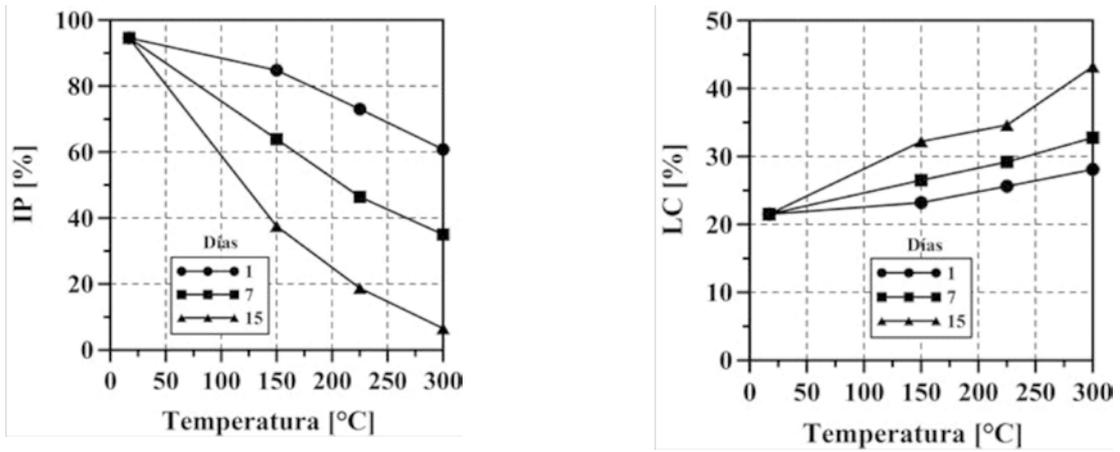


Figura 2. Evolución del IP y LC cuando se somete la arcilla 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición

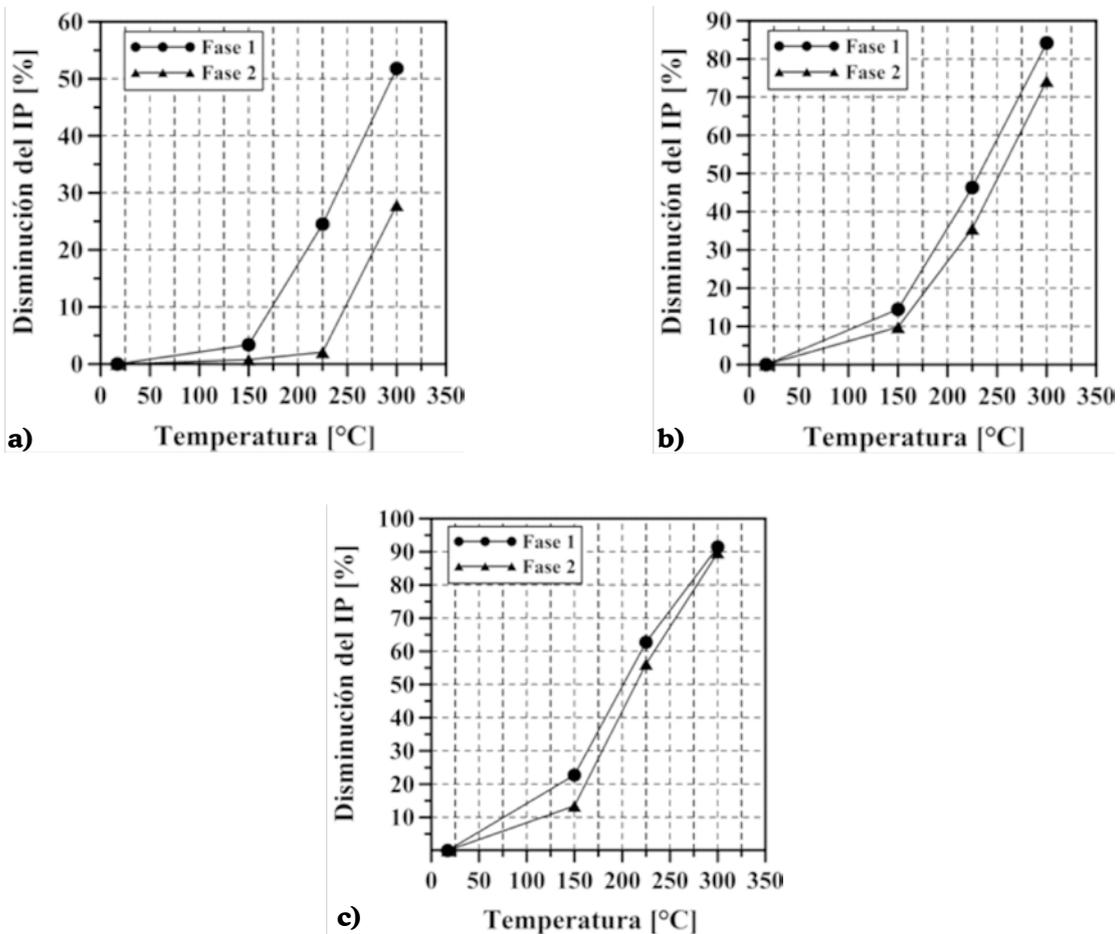


Figura 3. Efecto de la temperatura sobre la arcilla 1 para exposiciones de a) 1 día, b) 7 días y c) 15 días

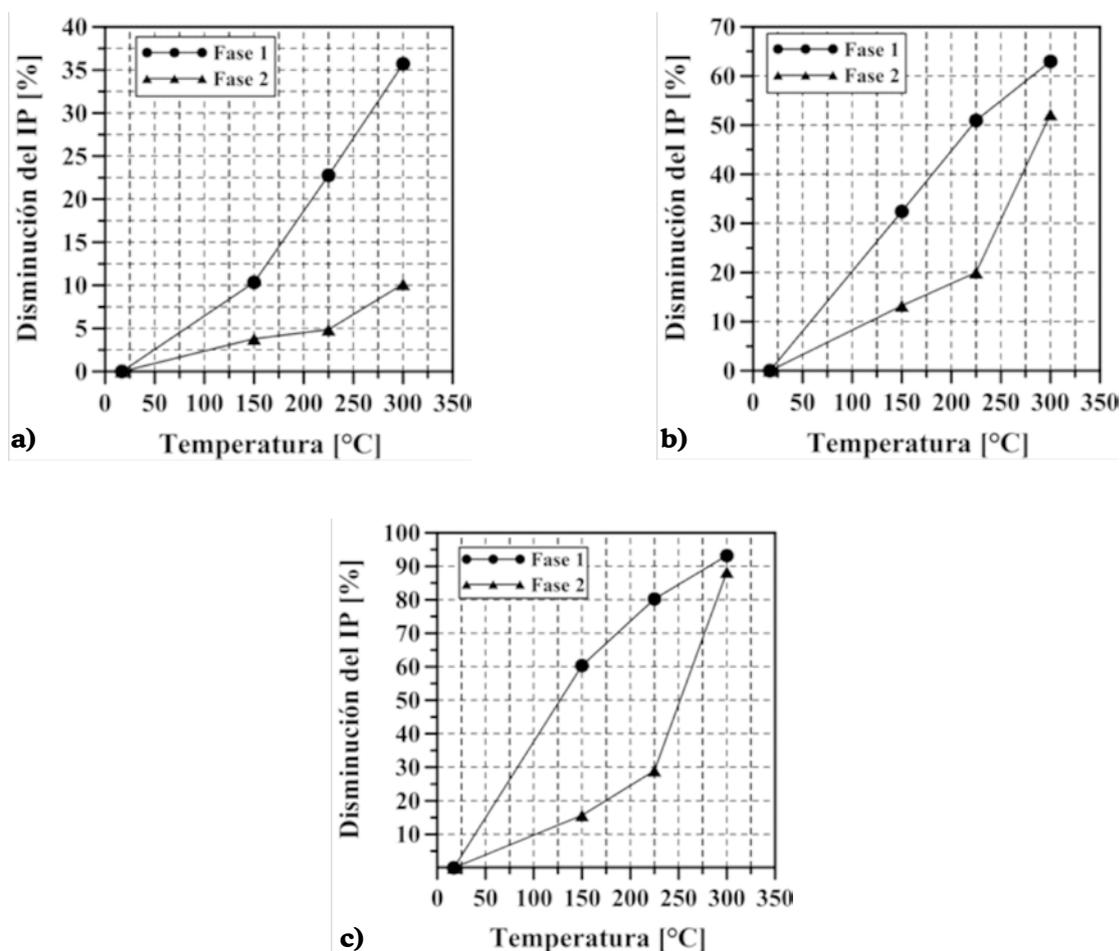


Figura 4. Efecto de la temperatura sobre la arcilla 2 para exposiciones de a) 1 día, b) 7 días y c) 15 días

3.2 Expansión

En las figuras 5-8 se observa que el potencial de cambio volumétrico de las arcillas disminuye cuando se aumenta la temperatura de las muestras. La mayor disminución ocurre cuando se someten las muestras a una temperatura de 300 °C durante 15 días. A esta temperatura y tiempo de exposición de las muestras, el índice de hinchamiento disminuye 59,04 % y 84,79 % para las arcillas 1 y 2 respectivamente. Para el caso de la expansión libre y en consolidómetro esta disminución es de 91% para ambos tipos de arcilla. En la figura 8 se observa,

luego de remoldear y humedecer las muestras (fase 2 explicada en la sección 2), un comportamiento en el ensayo de expansión libre similar al reportado para el caso del índice de plasticidad. La recuperación de la propiedad de expansión libre es mayor en la arcilla 2. En ambas arcillas, cuando se someten a 300 °C durante 15 días, el efecto de recuperación es casi nulo. Con un día de sometimiento de las arcillas a temperaturas entre 150 a 300 °C no se generan cambios sustanciales en la disminución del potencial de las muestras. Los cambios en las propiedades de expansión de las arcillas se calcularon con ecuaciones similares a 1 y 2.

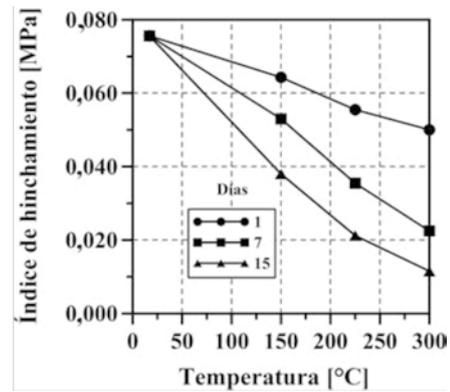
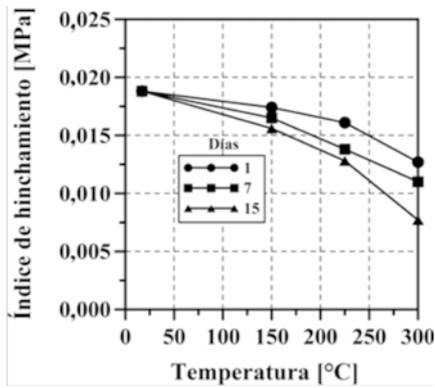


Figura 5. Evolución del índice de hinchamiento cuando se someten las arcillas 1 y 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición

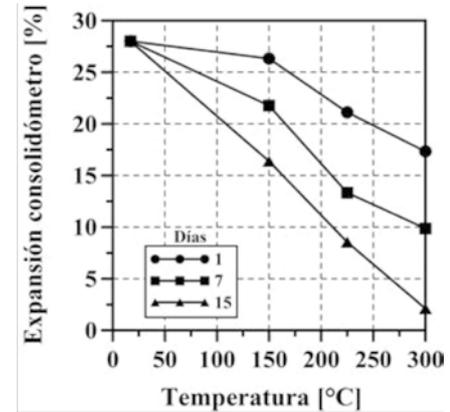
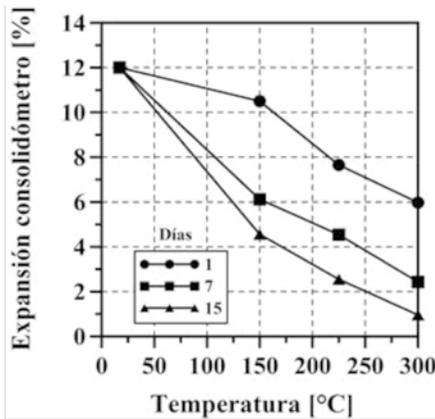


Figura 6. Evolución de la expansión en consolidómetro cuando se someten las arcillas 1 y 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición

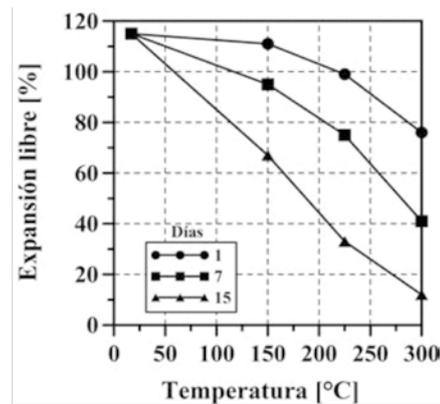
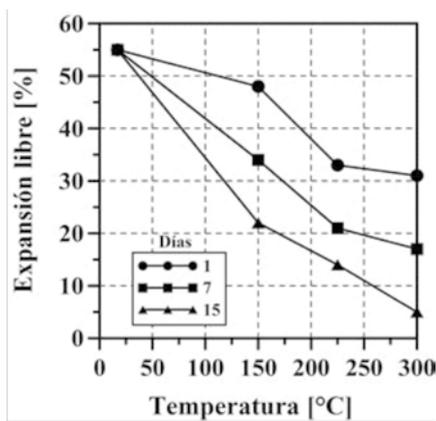


Figura 7. Evolución de la expansión libre cuando se someten las arcillas 1 y 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición

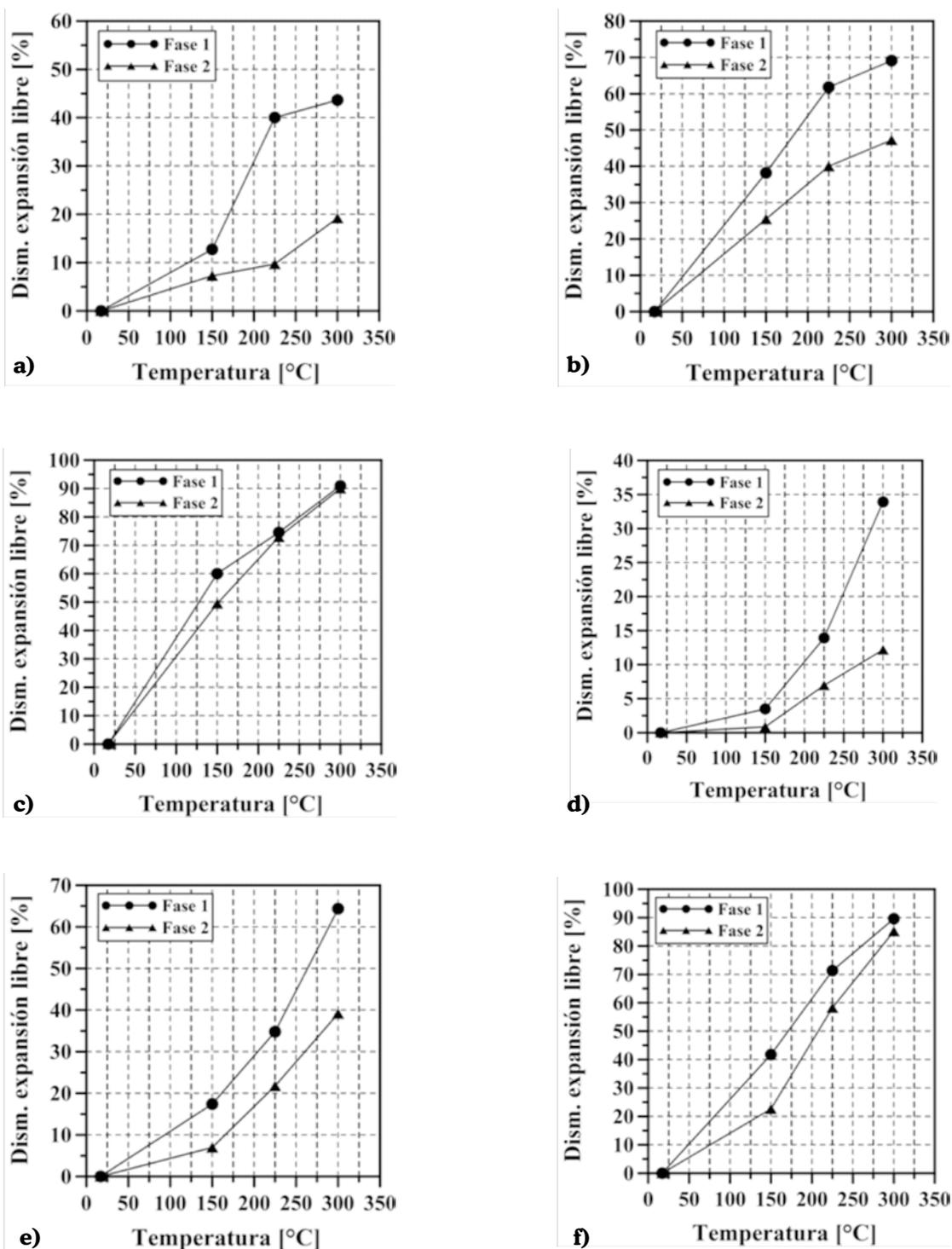


Figura 8. Disminución de la expansión libre cuando se somete la arcilla 1 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición durante a) 1 día, b) 7 días, c) 15 días, y la arcilla 2 durante d) 1 día, e) 7 días y f) 15 días

3.3 Resistencia a la compresión inconfínada (q_u)

En las figuras 9 y 10 se observa que la resistencia a la compresión inconfínada (q_u) de las arcillas disminuye conforme se incrementan la temperatura de las muestras y su tiempo de exposición. Cuando se aplica temperatura entre 150 y 300 °C durante 15 días, el material pierde totalmente su resistencia a la compresión inconfínada. Lo mismo sucede cuando se aplican 300 °C durante 1 y 7 días. Lo anterior es debido a que las partículas de arcillas cuando se someten a altas temperaturas pierden sus propiedades plásticas y de cohesión, generando disminución en su resistencia mecánica bajo carga monótonica. El decrecimiento en q_u es mayor cuanto más plástico

sea el material. Los cambios en q_u de las arcillas se calcularon mediante ecuaciones similares a 1 y 2.

Sobre la arcilla 1 no fue posible evaluar el efecto del rehumedecimiento y remoldeo de las muestras sobre el q_u , debido a que fueron ensayadas en condición inalterada. Sobre la arcilla 2, la cual fue fabricada por compactación, sí se pudo evaluar dicho efecto (ver figura 10). La arcilla 2 al ser sometida a 300 °C durante 15 días no recuperan su resistencia a la compresión simple, debido a la pérdida casi total de su plasticidad y cohesión. Un comportamiento similar experimentan las muestras sometidas al mismo tiempo y a temperaturas entre 150 y 225 °C. La recuperación del q_u solo se evidencia para muestras sometidas a temperatura de 150 expuestas durante 1 y 15 días.

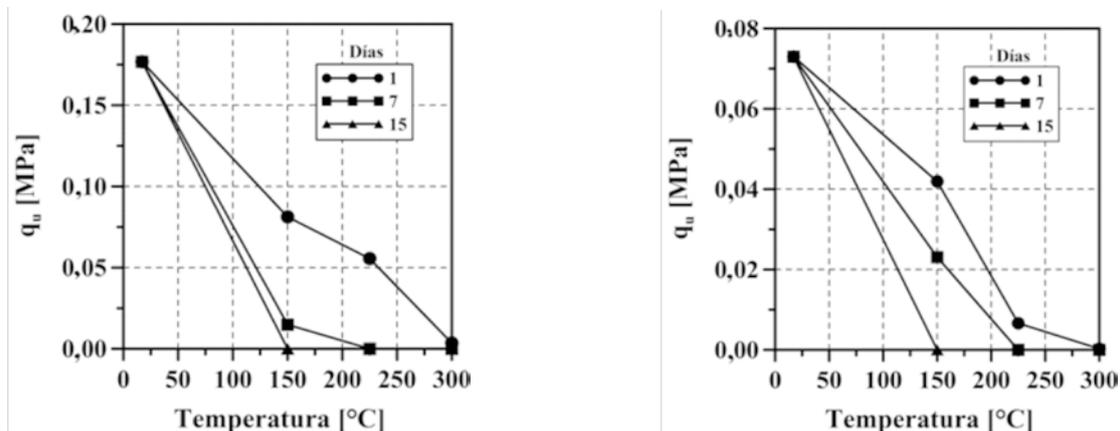


Figura 9. Evolución de la resistencia a la compresión inconfínada (q_u) cuando se someten las arcillas 1 y 2 a diferentes temperaturas

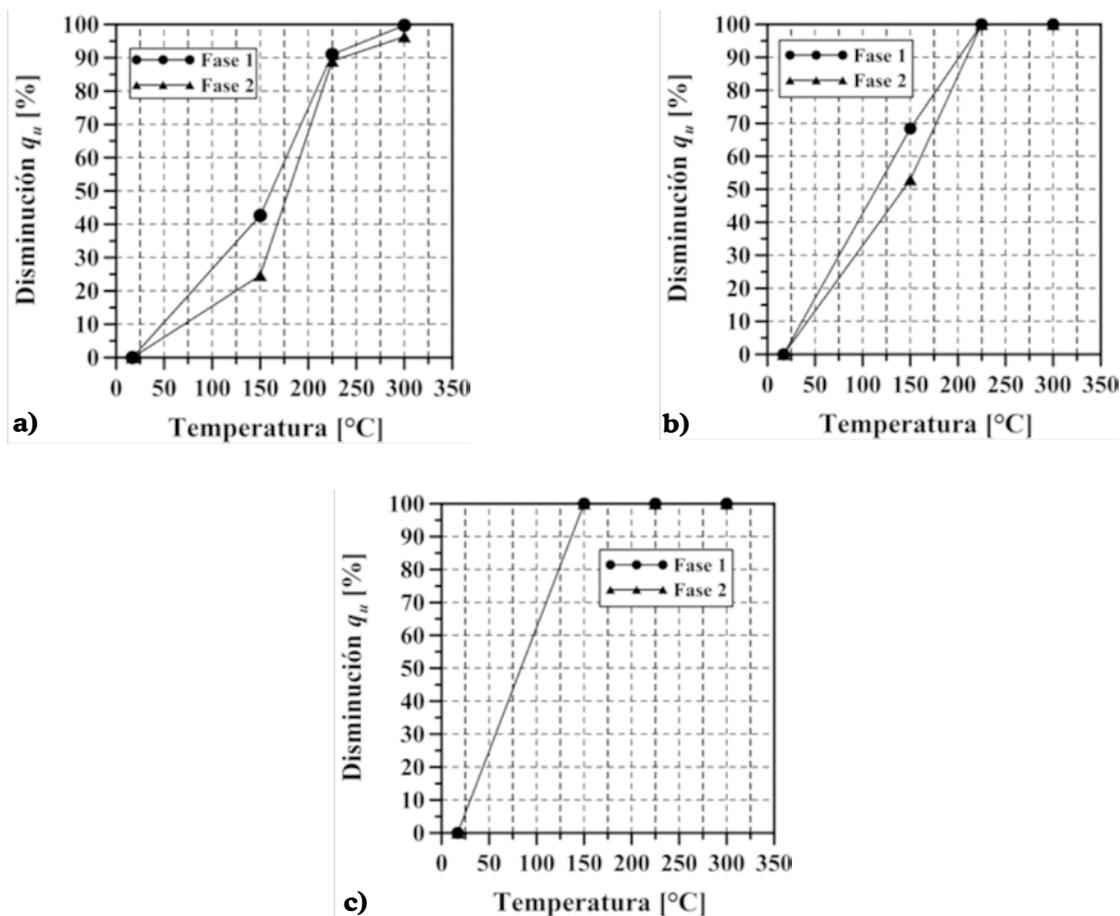


Figura 10. Disminución del q_u cuando se somete la arcilla 2 a diferentes temperaturas y tiempos de exposición durante a) 1 día, b) 7 días, c) 15 días

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Ha sido ampliamente evidenciado y reportado en la literatura de referencia (p. ej., Legget, 1964; Budhu, 2000) que, en suelos finos como las arcillas, las fuerzas y fenómenos actuantes sobre la superficie de las partículas sólidas influyen de manera significativa en el comportamiento mecánico y las propiedades físicas de dichos suelos. En las arcillas las partículas sólidas presentan sobre su superficie cargas eléctricas negativas (aniónicas) que atraen cationes provenientes de moléculas de agua circundantes dentro de los espacios vacíos de la masa de suelo. El

agua al ser adsorbida por la partícula sólida genera una lámina delgada denominada doble capa difusa de la cual dependen en gran parte las propiedades de plasticidad y expansión que experimentan las arcillas. Mayor información sobre este fenómeno puede consultarse en Richards (1974), Malagón y Montenegro (1990) y Mitchell (1993). Si esta agua adsorbida o doble capa difusa es removida, las arcillas pierden su potencial de expansión y plasticidad en presencia de agua. El problema es que esta capa no es fácilmente removida por aplicación de carga o remoldeo. Lo que se prevé en el presente estudio es que las arcillas al ser sometidas a temperaturas superiores a 300 °C durante 15 días experimentan una eliminación total

del agua adsorbida, que no puede ser recuperada por procesos de rehidratación tal como ha sido verificado por diversos investigadores que han sometido estos materiales a temperaturas entre 200 y 400 °C (p. ej., Saborío y Zárate, 1964; Highway Research Board, 1970; Rico y Del Castillo, 2006). Así mismo se prevé que los incrementos en la temperatura y tiempos de exposición sobre las arcillas generan pérdidas en las fuerzas de atracción eléctrica del agua adsorbida.

5. CONCLUSIONES

Las dos arcillas estudiadas experimentaron cambios en sus propiedades índice, potencial de expansión y resistencia a la compresión inconfiada cuando fueron solicitadas en un rango de temperatura de 150-300 °C durante 1-15 días. Para el caso de los límites de consistencia la tendencia fue a disminuir el IP y aumentar el LC cuando se incrementaban la temperatura y los tiempos de exposición. De la misma forma el potencial de expansión disminuye y la resistencia a la compresión inconfiada decrece de manera drástica en estas condiciones. Las muestras de arcilla sometidas durante 15 días a temperatura de 300 °C pierden la capacidad de recuperar sus propiedades índice, de expansión y resistencia a la compresión simple. Esta sería la condición ideal para pensar en utilizar este rango de temperatura con el fin de mejorar *in situ* subrasantes arcillosas, de alta plasticidad y potencial de expansión, en estructuras de pavimentos, así mismo, usar esta temperatura como método para la generación o fabricación de llenantes minerales.

Lo expuesto hace prever que aplicar temperatura a arcillas *in situ* podría llegar a ser un mecanismo para modificar de manera benéfica propiedades que pueden ser indeseables cuando este tipo de material se utiliza como elemento para cimentar estructuras de obras civiles.

Las fases futuras del proyecto evaluarán características dinámicas de las arcillas tales como módulo resiliente y la evolución de las propiedades

químicas y eléctricas con la temperatura, con el fin de entender la presencia de los cambios en los parámetros reportados en la presente investigación.

REFERENCIAS

- Abu-Zreig, M. M.; Al-Akhras, N. M. and Attom, M. F. (2001). "Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils". *Applied Clay Science*, vol. 20, No. 3 (November), pp. 129-135.
- Alvarado, J. A. y Torres, C. A. *Estabilización de una arcilla blanca con cemento*. Tesis de grado (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2002.
- Angarita, H. y Díaz, H. I. *Uso de enzimas orgánicas como alternativa de estabilización de subrasantes y sub-bases en Santafé de Bogotá*. Tesis de grado (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1995.
- Arias, O. E. *Métodos de estabilización de suelos de subrasante para pavimentos utilizados en Bogotá*. Tesis de grado (Ingeniería Civil), Universidad de los Andes, Bogotá, 2002.
- Budhu, M. *Soil mechanics and foundations*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 656 p.
- Celedón, J. y Lazcano, G. *Arcillas expansivas y su tratamiento en subrasantes de vías y aeropuertos*. Tesis de Postgrado (Especialización en Ingeniería de Pavimentos), Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2001.
- Delgado, R. y Suárez, A. *Estabilización de materiales granulares teniendo como guía la norma INVIAS (Artículo 340) con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta y diferentes porcentajes de cemento*. Tesis de grado (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2000.
- Díez, L. y Montes, O. *Estudio de la estabilización de subrasantes con productos químicos*. Tesis de maestría (Ingeniería Civil), Universidad de los Andes, Bogotá, 2002.
- Farag, I. (1993). "Simulating hazardous waste incineration". *Chemical Engineer*, No. 538, pp. 11-16.
- Garnica, P.; Pérez, A.; Gómez, J. A. y Yaraví, E. O. *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 201, 2002.
- Highway Research Board. (1970). "Construction of embankments". *Synthesis of Highway Practices*, No. 88, Washington D.C.



- Instituto Nacional de Vías –INVIAS–. *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá, 2007.
- Joshi, R. C.; Achari, G.; Horsfield, D. and Nagaraj, T. S. (1994). "Effect of heat treatment on strength of clays". *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, No. 6 (June), pp. 1080-1088.
- Legget, Robert F. *Geología para ingenieros*. 3a. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1964. 883 p.
- Malagón, D. y Montenegro, H. *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 1990. 811 p.
- Merchán, S. D. *Comportamiento de un suelo fino estabilizado con columnas de cal, suelo y cemento, análisis con modelo experimental*. Tesis de grado (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2007.
- Mitchell, J. K. (1969). "Temperature effects on the engineering properties and behaviour of soils". *Highway Research Board*, Special Report 103.
- Mitchell, J. K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- National Lime Association (NLA) (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal: Estabilización y modificación con cal*. Boletín 326.
- Pinzón, J. *Mejoramiento de subrasantes arcillosas mediante la adición de cal y cenizas volantes del carbón*. Tesis de Postgrado (Especialización en Ingeniería de Pavimentos), Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2002.
- Richards, B. G. *Behavior of unsaturated soils*. In: I. K. Lee (ed.). *Soil mechanics: New horizons*. New York: American Elsevier, 1974. pp. 112-157.
- Rico, A. y Del Castillo, H. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. vol. 2. México: Limusa, 2006, 643 p.
- Saborío, J. y Zárate, M. (1964). *Métodos de control rápido de la compactación y la humedad en terraplenes*. Publicación de la Secretaría de Obras Públicas de México, México D.F.
- Tan, Ö.; Yilmaz, L. and Zaimoğlu, A. Sahin (2004). "Variation of some engineering properties of clays with heat treatment". *Materials Letters*, vol. 58, No. 7-8 (March), pp. 1176-1179.
- Varlakov, A.; Sobolev, I.; Barinov, A.; Dmitriev, S.; Karlin, S. and Flit, V. (1997). *Method of treatment of radioactive silts and soils*. Proceedings of the 1996 MRS Fall Meeting, Moscow, Russia. Materials Research Society, Pittsburgh, PA, pp. 591-594.