

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Mejoramiento de Suelos Arcillosos por Medio de Procesos de Fusión en el Laboratorio

Lesly Nathalie LÓPEZ VALIENTE<sup>a,1</sup> y Luis Alberto CACERES CARDENAS<sup>b,2</sup>

<sup>a</sup>*Docente Escuela de Ingeniería Civil; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales "GIISAC", Colombia, lesly.lopez@uptc.edu.co. Semillero en Investigación Geotécnica "SIGEO"*

<sup>b</sup>*Docente Escuela de Ingeniería Civil; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales "GIISAC", Colombia, luis.caceres@uptc.edu.co.*

**Resumen.** Dentro del proceso de estabilización de suelos blandos con granulometría fina, es conocido que en la actualidad existen diversas técnicas que permiten obtener resultados adecuados de mejoramiento de sus propiedades esfuerzo-deformación, técnicas en las que se hacen caracterizaciones de una condición inicial y final. En el presente libro se dan a conocer los resultados en cuanto al cambio de propiedades físicas y mecánicas de los suelos finos, en especial los suelos arcillosos sometidos a procesos de calentamiento mediante la exposición de estos a diferentes temperaturas, buscando así ampliar el conocimiento de este proceso como alternativa de estabilización. Los suelos de origen reciente, son frecuentemente materiales en los que su comportamiento está ligado a la historia geológica, por lo que es común encontrar suelos que ofrecen problemas de baja resistencia y deformación excesiva, lo que hace necesario el "mejoramiento" de su comportamiento geotécnico.

En este artículo se tratan temas concernientes al cambio que se da en los suelos sometidos a alta temperatura, la metodología, consistió en la caracterización física y mecánica de un suelo arcilloso de la ciudad de Tunja (Colombia compuesto por la formación Tilata y el depósito fluviolacustre, para posteriormente exponerlo a la acción del calor en diversos ciclos y magnitudes, con la posterior verificación de las nuevas características físico-mecánicas, ello permitió establecer y cuantificar algunos de los cambios en el suelo ensayado, y el análisis de esta información nos permite obtener relaciones que podrán utilizarse como referentes en el empleo de esta técnica y su posible aplicación en el desarrollo de proyectos de ingeniería

**Palabras Clave.** Suelo, tratamiento, cambio, calentamiento, fusión, resistencia, composición.

<sup>1</sup> Lesly Nathalie LOPEZ VALIENTE, País Colombia, lesly.lopez@uptc.edu.co

<sup>2</sup> Luis Alberto CACERES CARDENAS, País Colombia, luis.caceres@uptc.edu.co.

## 1. Introducción

El desarrollo de la Geotecnia, dentro del campo de Ingeniería Civil comprende principalmente el estudio del comportamiento del suelo que sirve de fundación o de soporte al desarrollo de una obra civil, de acuerdo a esto se evidencia en algunas ocasiones que este no brinda la capacidad de soporte adecuada para la construcción del proyecto, razón por la cual se hace necesario recurrir a técnicas de mejoramiento de suelos que contribuyan al aumento sus propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta el gran desarrollo Urbanístico que se presenta en la actualidad es necesario emplear técnicas de optimicen los procesos constructivos y que contribuyan a la economía de una región.

En el presente artículo se estudia un suelo de origen reciente obtenido a partir de perforaciones manuales realizadas dentro de una zona geológica del depósito Fluvioacustre de la ciudad de Tunja, teniendo como premisa que estos suelos poseen características mineralógicas y química innatas de su formación. Por medio de la investigación se busca poder establecer el cambio de las propiedades de resistencia no drenada, límites de Atterberg y microfabrica teniendo en cuenta el cambio de temperatura en intervalos entre 150 °C a 1050°C en diferentes tiempos de exposición, lo anterior descrito para suelo de granulometría fina. Dentro de la investigación se realizó una revisión bibliografía detallada con el fin de poder tener un mejor panorama de esta técnica de mejoramiento, a continuación se citan algunos investigadores a nivel internacional y nacional que han generado documentos de esta técnica sometimiento el suelo a altas temperaturas.

Rondón, Hugo Alexander realizo la evaluación del comportamiento de arcillas sometidas a diferentes tiempos de exposición de altas temperaturas donde se tuvieron tiempo de 1 a 15 días con el objetivo de estudiar si las arcillas recuperaban o no las propiedades de resistencia, su meta a cumplir era demostrar si este método sirve como método de estabilización de suelos [1]. A. Akbar Firoozi, M. R. Taha, A. Asghar Firoozi, Tanveer A, Assessment of Heat Treatment on Clays Mixed with Sílica Sand Este estudio examina los efectos del tratamiento de calor en dos tipos de arcillas mezcladas con arena de sílice en condiciones de laboratorio. Los suelos se sometieron a tres temperaturas 100, 250 y 500°C. Las propiedades de los suelos estudiados fueron los límites de Atterberg, humedad óptima y resistencia a la compresión no confinada. Los resultados experimentales mostraron que la temperatura mayor que 100°C reduce los límites de Atterberg, el contenido de agua óptimo y presenta un cambio en la resistencia a la compresión no confinada. [2].

Rodríguez, Edgar A. Evaluación del comportamiento Geo mecánico de arcillas en el Sector de Campo alegre – Ciudad De Barranquilla establece el tratamiento y mejoramiento que se le pueden dar a las arcillas de Barranquilla en donde inicialmente establece el marco de los suelos parcialmente saturados, el programa experimental dentro de los cuales hace caracterización física, microestructural de la arcilla y finalmente se concluyen las características principales de las arcillas y sus mejoramientos [3]. Restrepo, Luis Ernesto, realiza una investigación acerca del Mejoramiento de suelos finos a partir de electroósmosis, donde se establece y se analiza el sistema de electroósmosis, realizando pruebas en suelos finos con la aplicación de corrientes eléctricas en el laboratorio relacionando los resultados con los parámetros geomecánicos obtenidos en la realización de las pruebas. Y se concluye finalmente que “La resistencia en las muestras analizadas aumentó, debido al proceso

de electroósmosis, en una relación de 1:1.3 a 1:11, medida en pruebas de compresión inconfiada y de veleta, respectivamente. [4].

## **2. Resultados**

### ***2.1. Suelo en Estado Natural:***

La muestra en estado natural tiene una consistencia media, presenta un LL de 47,5 % y un LP de 23,7% teniendo en cuenta la resistencia a la compresión inconfiada presenta un valor de 1,8 Kg/cm<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 0,9 Kg/cm<sup>2</sup>.

### ***2.2. Suelo sometido a 150° C***

La muestra expuesta, tiene una consistencia media, presenta un LL de 54,5% y una LP de 28,1% teniendo en cuenta la resistencia a la compresión inconfiada presenta un valor de 32,8 Kg/cm<sup>2</sup>. Con un valor de Cohesión No Drenada de 16,4 Kg/cm<sup>2</sup>.

### ***2.3. Suelo con expuesto a 350°C***

La muestra sometida a este valor de temperatura tiene una consistencia media, presenta un LL de 45,01% y una LP de 25,3% teniendo en cuenta la resistencia a la compresión inconfiada presenta un valor de 9,9 Kg/cm<sup>2</sup>. Con un valor de Cohesión No Drenada de 5,0 Kg/cm<sup>2</sup>.

### ***2.4. Suelo sometido a 550°C***

La muestra de esta prueba tiene una consistencia media, presenta un LL de 43,9% y una LP de 24,8%, resistencia a la compresión inconfiada de 6,6 Kg/cm<sup>2</sup>, cohesión no drenada de 3,3 Kg/cm<sup>2</sup>.

### ***2.5. Suelo sometido a 650°C***

La muestra sometida a esta temperatura tiene una consistencia media, presenta un LL de 42,6% y una LP de 24,3% teniendo en cuenta la resistencia a la compresión inconfiada durante un proceso de Fusión de 2 h con ayuda de muflas, la muestra presenta un valor de 11,5 Kg/cm<sup>2</sup>, con un valor de cohesión no drenada de 5,7 Kg/cm<sup>2</sup>, a un tiempo de 4 h la muestra presenta un valor de 14,9 Kg/cm<sup>2</sup>, con un valor de cohesión no drenada de 7,5 Kg/cm<sup>2</sup>, finalmente para un tiempo de 8 horas de exposición del suelo a la temperatura de 650°C, este presenta un valor de 5,6 Kg/cm<sup>2</sup>, con un valor de cohesión no drenada de 2,8 Kg/cm<sup>2</sup>

### ***2.6. Tiempo de calentamiento 850 °C***

Para el rango de 850 grados centígrados a un tiempo de 2 horas de calentamiento registra un Límite de plasticidad de 20,47% y un Límite Líquido de 37,50% registrado así una clasificación teniendo en cuenta la carta de plasticidad de Arcilla de baja plasticidad CL, la muestra presenta un valor de 1564,2 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de

Cohesión No Drenada de 782,1 KN/m<sup>2</sup>. Para el rango de 850 grados centígrados a un tiempo de 4 horas de calentamiento registra un Límite de plasticidad de 22,51% y un Límite Líquido de 38,51% registrado así una clasificación teniendo en cuenta la carta de plasticidad de Arcilla de baja plasticidad CL, la muestra presenta un valor de 1128,7 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 564,4 KN/m<sup>2</sup>.

Para el rango de 850 grados centígrados a un tiempo de 4 horas de calentamiento registra un Límite de plasticidad de 19,17% y un Límite Líquido de 30,49% registrado así una clasificación teniendo en cuenta la carta de plasticidad de Arcilla de baja plasticidad CL, la muestra presenta un valor de 1956,4 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 978,2 KN/m<sup>2</sup>

### ***2.7. Suelo con proceso de Calentamiento a 1050°C.***

Las muestras fueron sometidas al ensayo de Compresión inconfiada mostrando los siguientes resultados; durante el proceso de Calentamiento de 2 h con ayuda de muflas, la muestra presenta un valor de carga última de 1963,3 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 978,2 KN/m<sup>2</sup>, a un tiempo de 4 h la muestra presenta un valor de 1196,4 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 598,2 KN/m<sup>2</sup>, finalmente para un tiempo de calentamiento de 8 h la muestra presenta un valor de 2795,9 KN/m<sup>2</sup>, con un valor de Cohesión No Drenada de 1397,9 KN/m<sup>2</sup>

Para este rango de temperatura a las muestras obtenidas no fue posible realizar las pruebas de Límites de consistencia, teniendo en cuenta esto se registra la muestra para esta temperatura como No líquida No plástica, comportamiento que se evidencia en su tipo de falla que tiende a la formación de grietas y además su condición es de humedad natural de 0%.

### ***2.8. Microscopio electrónico de barrido.***

Este ensayo fue realizado sobre muestras que se consideraron representativas y que tenían comportamientos diferentes en su resistencia no drenada. Teniendo en cuenta esto el suelo analizado corresponde al que se expuso al tratamiento térmico de 650 °C Y 850 °C con un tiempo de 4 horas, 1050°C con tiempo de exposición de 8 horas.

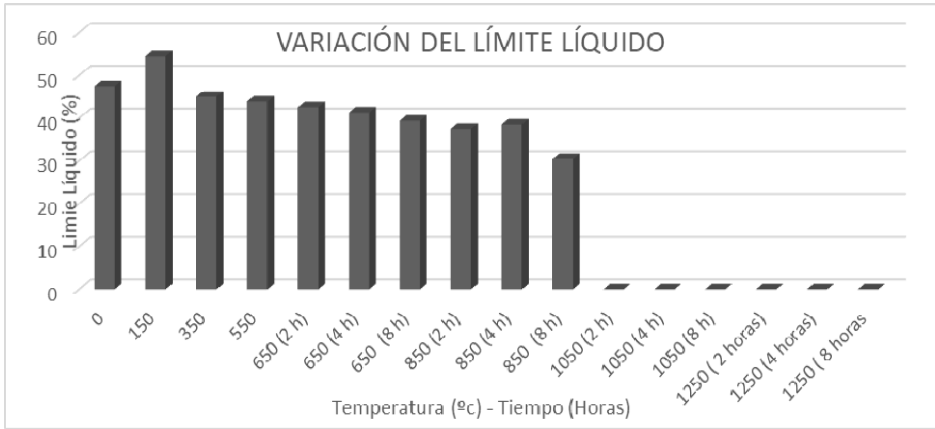
## **3. Análisis**

### ***3.1. Variación Límites de Atterberg***

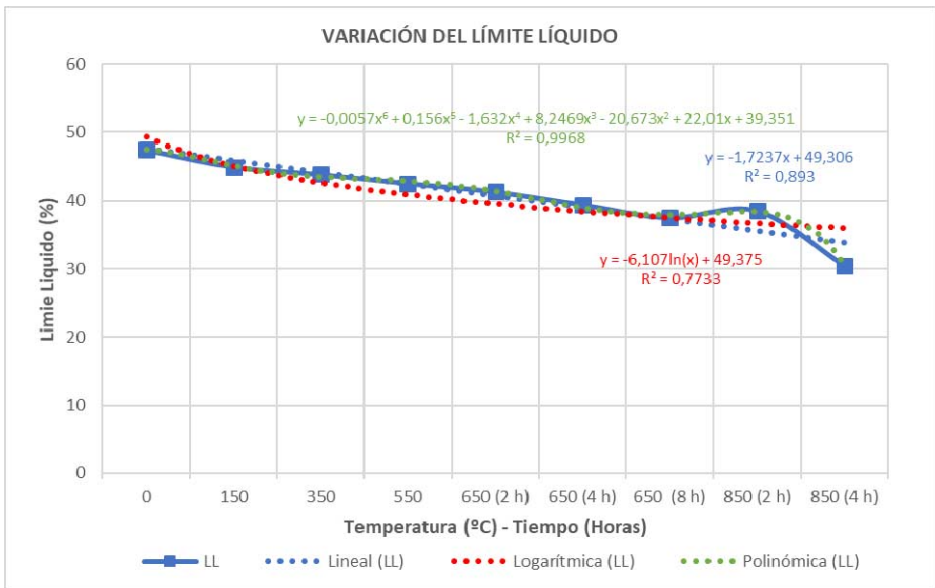
La tendencia de los mismos a pertenecer al grupo de la arcilla de baja plasticidad CL, sin embargo, se evidencia que la muestra sometida a temperatura de 150 °C presenta un comportamiento diferente al expuesto anteriormente clasificándose como CH Arcilla de alta plasticidad, dentro de las actividades ejecutadas se puede inferir que a esta temperatura el suelo logra experimentar una mayor cohesión entre partículas.

Teniendo en cuenta la tendencia observada en esta propiedad del suelo, se presenta en la figura 1 la variación del parámetro del Límite Líquido para la condición posterior al tratamiento de calentamiento aplicado a la muestra, se evidencia un comportamiento diferente en la muestra de suelo a 150 grados centígrados donde se observa el mayor valor de límite, sin embargo, para el resto de tratamientos el comportamiento tiende a la

disminución de este parámetro. Con la premisa de la muestra a 150°C y con la tendencia evidenciada se presenta a continuación la gráfica que muestra la relación estadística del límite líquido.



a) Variación del límite líquido



b) Ecuaciones variación límite líquido

Figura. 1. Variación límite líquido (Fuente: Propia).

Debido al modo de ejecución de este ensayo de evidencia que este parámetro sufre cambios leves en cuanto a su tendencia a la disminución, condición que se ve en el suelo sometido al tratamiento térmico de 850 °C (2h) donde se genera la pérdida de tendencia en cuanto a la disminución del parámetro y presenta similitudes en cuanto a su valor respecto a la muestra de 650°C (4h), condición que puede ser dada teniendo en cuenta el método por medio del cual se calcula el límite de plasticidad y posibles errores humanos que se puedan cometer

Otro cambio importante que se evidencia es el que se obtiene con la muestra a 150 °C, ya que genera un pico en la tendencia lineal a la disminución, razón por la cual no se tienen en cuenta dentro de las regresiones estadísticas. Las regresiones realizadas y que evidenciaron mayor ajuste al proceso son la de tipo lineal, logarítmica y polinómica, presentando la tendencia lineal un R de 0.89, para la logarítmica un R de 0.77 y finalmente para la polinómica de grado 6 un R de 0.968 tendencia que se ajusta mejor al comportamiento observado para el límite líquido, sin embargo teniendo en cuenta que el comportamiento general de este parámetro es a reducirse casi linealmente se considera la regresión lineal como la que mejor explica el comportamiento respecto a la temperatura aplicada. Teniendo en cuenta lo anterior expuesto se presenta a continuación la Ec. (1) de LL para el suelo analizado y el proceso térmico realizado.

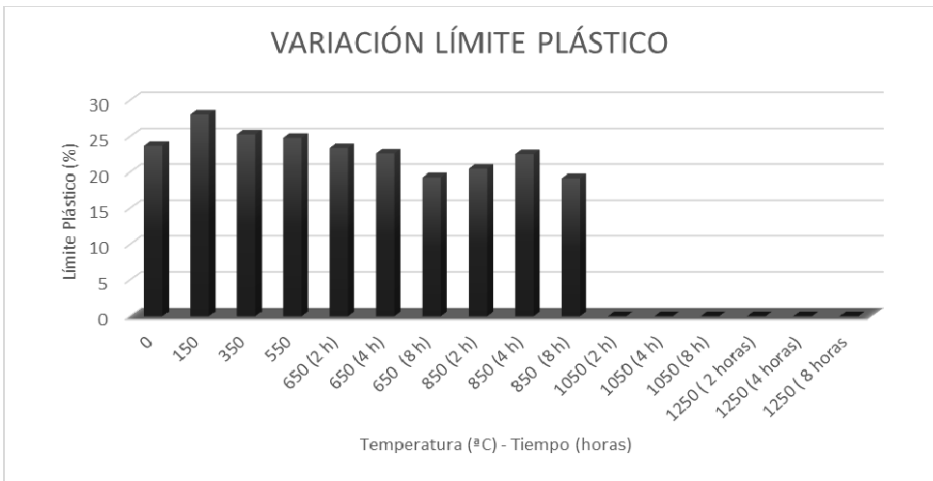
$$LL (\%) = 49,306 - 1,7237 (T) \tag{1}$$

donde LL : Límite Líquido en %; T : Temperatura en °C.

Dentro del análisis realizado se decidió no tener en cuenta el valor del límite líquido para la segunda muestra analizada (150°C) debido a la dispersión que esta genera dentro del rango de valores obtenidos, y sustentado en que técnicamente el comportamiento de reducción de este factor depende notablemente del mejoramiento que se realiza a la muestra.

Una vez se evidencia la variación de la condición de plasticidad evaluada por medio de los límites de Atterberg se realiza un tratamiento estadístico similar al practicado en la variación del límite líquido, y según lo observado se tiene una tendencia lineal en cuenta a su disminución.

En la Figura 2 se puede observar que se aplicaron al comportamiento una serie de líneas de tendencia; registrando una regresión lineal con un ajuste de tendencia R de 0.6296, la logarítmica de 0.5148 y la polinómica de grado 6 un R de 0.97, se presenta a continuación lo propuesto para el límite plástico en la Ec. (2).



a) Variación del límite Plástico

**Figura. 2.** Variación límite Plástico (Fuente: Propia).

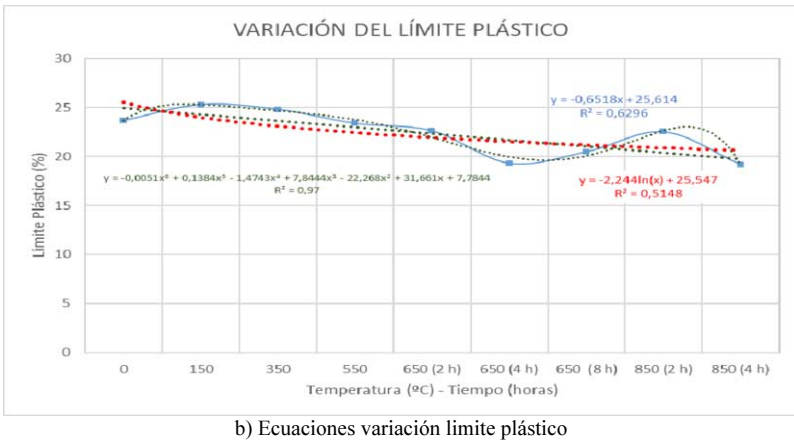


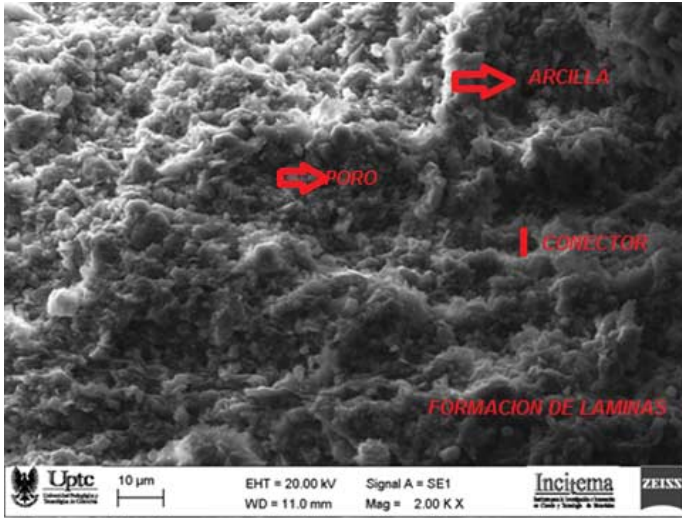
Figura. 2. (continuación) Variación límite Plástico (Fuente: Propia).

$$LP (\%) = 25,61 - 0,6518T \quad (2)$$

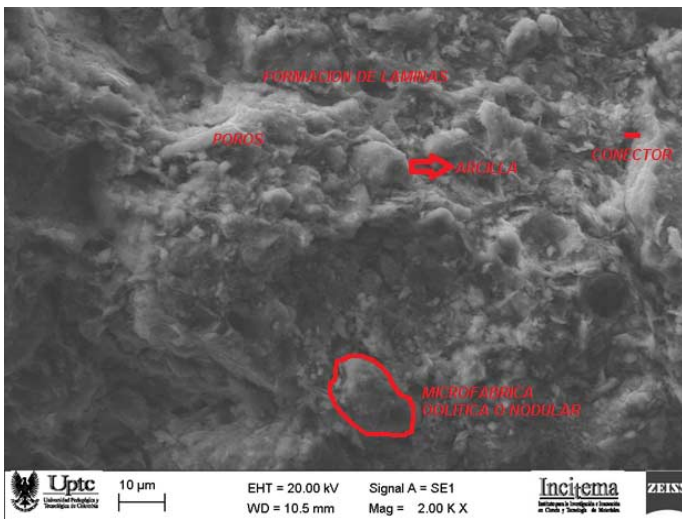
donde LP: Límite de plástico en %; T: Temperatura en °C.

### 3.2. Análisis de Microfábrica.

- **Condición Natural.** Esta muestra presenta una tipología de Microfábrica Láminar, que presentan estructura compacta y anisótropa lo que hace que su porosidad sea reducida o muy baja, su resistencia al cortante depende de la orientación de las láminas, suelo que por presentar esta característica no presenta riesgo de colapsabilidad. Se evidencia en una coloración oscura los conectores que se forman entre las partículas de arcilla, los poros se evidencian con escasos en la porción de muestra analizada.
- **Muestra a 650 °C (4h).** En esta condición la muestra sigue conservando su tipología Laminar, presentado así igualmente muy baja porosidad, los poros se han reducido, se ve una vista de la fracción de suelo un poco más homogénea en algunas secciones se evidencia una tipología Nodular lo que hace que el suelo tenga un poco más de resistencia, pero presente una porosidad baja. Esta Microfábrica genera que la muestra a esta temperatura pueda presentar mayor resistencia condición que se evidencia respecto a la resistencia en estado natural referenciada en el valor de la cohesión no drenada del suelo analizado.
- **Muestra a 850 °C (4h).** En esta etapa de calentamiento térmico se observa una muestra más compacta, se evidencia la formación de láminas y rasgos de la Microfábrica nodular lo que genera en cierta medida que la muestra presenten más resistencia respecto a su condición natural, no se evidencian poros en la muestra.
- **Muestra a 1050 °C (8h).** Esta porción de muestra presenta una Microfábrica nodular generando mayor resistencia sin embargo se evidencia algunas secciones de láminas conservando su condición inicial, se conserva en la muestra la condición de muy baja a baja porosidad.

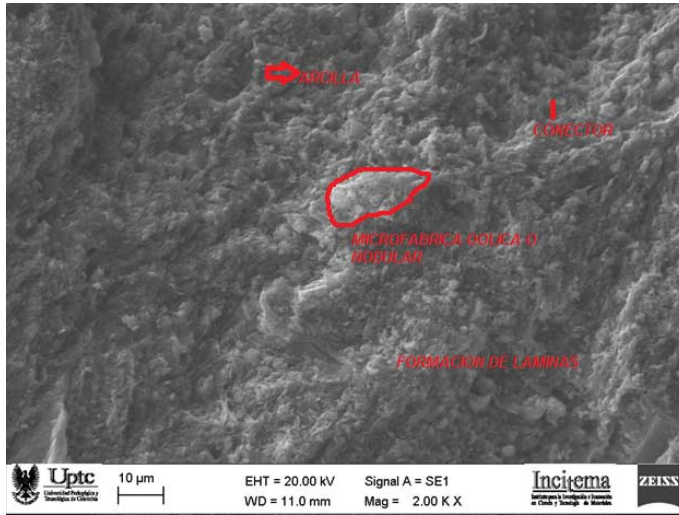


a) Condicion natural

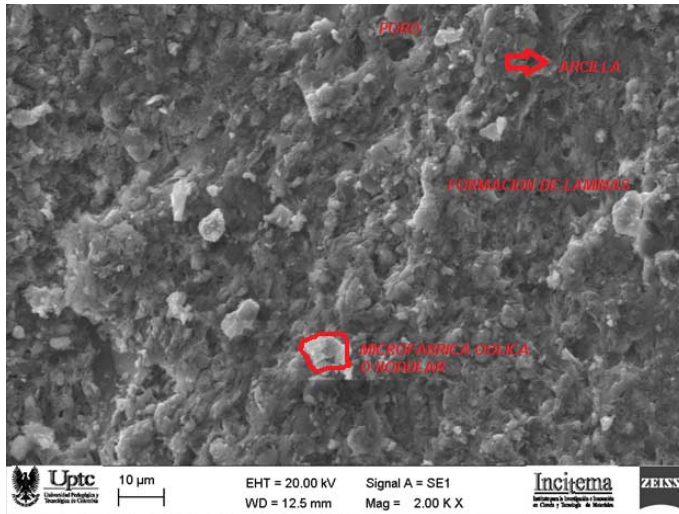


b) Condicion 650 °C ( 4h)

Figura. 3. Microfabrica. (Fuente: Incitema UPTC Tunja).



c) Condicion 850 °C ( 4h)



d) Condicion 1050 °C (8h)

Figura. 3. (continuación) Microfabrica. (Fuente: Incitema UPTC Tunja).

#### 4. Conclusiones

Teniendo en cuenta lo adelantado dentro de la investigación, se establece la metodología para poder implementar el calentamiento de suelos finos en el laboratorio, sin embargo, se evidencia que este tratamiento puede servir igualmente como mejoramiento del suelo siempre y cuando se requiera, aumentar su cohesión no drenada como parámetro importante de resistencia de un suelo fino.

De acuerdo al ensayo de límites de Atterberg se establece que el comportamiento del suelo analizado tiende a mejorar con el aumento de la temperatura comportándose de manera lineal, sin embargo se nota que el suelo con tratamiento térmico a 150

grados centígrados presenta un comportamiento diferente pasando de baja a alta plasticidad, donde el suelo podría generar una mayor resistencia al cortante y por ende una mayor cohesión entre partículas, el comportamiento registrado para esta temperatura se encuentra como anómalo dentro de la investigación, por eso dentro de las regresiones estadísticas no fue tenido en cuenta.

La cohesión no drenada presenta con algunas temperaturas rangos muy cercanos, teniendo a 350 grados centígrados valores de resistencia muy cercanos a los encontrados a 850 grados centígrados a 4 horas, lo que indica que el suelo analizado mejora sus propiedades de resistencia a 350 grados centígrados.

La condición inicial del suelo evidencia que su resistencia natural es media, generando con esto sobrecostos en las edificaciones que se requieran construir sobre los suelos con estas consistencias; teniendo en cuenta esto se evidencia que el tratamiento térmico mejora sus propiedades y por ende su capacidad portante. Sin embargo, es necesario ampliar la presente investigación para poder establecer efectividad en el perímetro del calentamiento una vez realizado en campo. En los ensayos de laboratorio realizados se tuvo especial cuidado con el choque térmico que pudieran experimentar las muestras al ser sacadas de la mufla equipo donde se realizó el calentamiento ya que en muchas ocasiones las muestras podrían presentar fisuras lo que podía sin lugar a duda modificar la resistencia a la compresión inconfínada.

Las Microfábricas observadas dentro del análisis con el microscopio de barrido electrónico MEB dejan concluir que las muestras sufren un proceso de reducción en su relación de vacíos, se evidencia que inicialmente se presentan Láminas con presencia de poros dentro de la condición inicial sin embargo a medida que se genera el aumento de la temperatura la muestra se hace más densa presentando una Microfábrica nodular y turbostrática lo que hace que la muestra presente menos relaciones de vacíos y mayor resistencia al cortante; otra evidencia del mejoramiento con calentamiento que se le puede proporcionar a un suelo

## Referencias

- [1] RONDON, Hugo Alexander. Evaluación Del Comportamiento De Arcillas Sometidas A Diferentes Tiempos De Exposición A Altas Temperaturas. Revista EIA. revista@eia.edu.co. Escuela de Ingeniería de Antioquia Colombia.2011. ISSN: 1794-1237
- [2] A. Akbar Firoozi, M. R. Taha, A. et al. Evaluation of Physical Properties of Clays Mixed with Sílica Sand. Jurnal Kejuruteraan 26(2014): 77-81.
- [3] RODRIGUEZ, Edgar A, Evaluación del comportamiento Geo mecánico de arcillas en el Sector de Campo alegre – Ciudad De Barranquilla. 2014
- [4] RESTREPO, Luis Ernesto, Tesis de Maestría, Mejoramiento de suelos finos a partir de la electroósmosis. Universidad Nacional de Colombia. 2014
- [5] KARAMAN, Sedat et. Furung Temperatura and firing time influence on mechanical and physical propoerties of clays bricks. 2005
- [6] BUENFIL, Carlos. Caracterización experimental del comportamiento Hidromecánico de una arcilla compactada. 2007
- [7] LOPEZ, Alvaro. MEJORA Geotecnia del suelo. Senior Soil Engineer. Consejo superior de investigaciones científicas. España. 1983
- [8] TSIGE M y Gonzalez Vallego L. Microfábrica de las arcillas azules del Guadalquivir y su relación con los procesos de meteorización. 1998.
- [9] BRAJA, M das. Soil Mechanics. Laboratoy Manual, Sixth Edition, Dean College of engineering and computer science. California State University, p 9-41
- [10] BUAZA, C. Juan Diego. Tratamiento de suelos arcillosos mediante Cal. Pag 21