

Resilient-modulus degradation of low-plasticity clays due to coal combustion residuals

Degradación del módulo resiliente, debida a residuos producto de combustión de carbón, en arcillas de baja plasticidad

C. Solórzano *, D. Zambrano *, H. Vacca *, J. Larrahondo ^{1*}

* Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 20/06/2019
Fecha de Aceptación: 08/10/2019
PAG 225-241

Abstract

Coal combustion residuals (CCR) are waste products generated during the operation of coal-fired electric power stations, but the effect of CCR inclusions on the deterioration of road infrastructure at or near power plants remain uncertain. This study measured the resilient modulus (M_r) of low-plasticity clay (FS) mixtures with different proportions of CCR obtained from a coal-fired power station, without any additional cementitious substances or stabilizers. Resilient moduli were determined for both the raw materials (FS and CCR) and for mixtures ranging between 10% and 40% CCR by weight. All materials were characterized physically, chemically, and mineralogically. Resulting physical and mechanical-behavior parameters were compared across the CCR content range, specifically the change in index properties, USCS classification, maximum dry density, and resilient-modulus degradation. Results highlight the strong dependence of the soil's resilient moduli on water content due to the inherent partially-saturated character of the material.

Keywords: Subgrade, clay, fly ash, coal combustion residuals (ccr), resilient modulus

Resumen

Los residuos producto de combustión de carbón (RPCC) se generan en plantas termoeléctricas, pero el efecto de la contaminación por RPCC en el deterioro de la infraestructura vial en inmediaciones de dichas plantas es incierto. Este estudio midió el efecto de la presencia de diferentes proporciones de RPCC provenientes de una central termoeléctrica, sobre el módulo resiliente (M_r) de un suelo fino (SF) tipo arcilla de baja plasticidad, sin la adición de cementantes o estabilizantes adicionales. Previa caracterización física, química y mineralógica de los materiales, se obtuvo el módulo resiliente para SF y RPCC y para mezclas en peso entre 10% y 40% de RPCC. Con estos resultados, se comparó el comportamiento físico y mecánico de los materiales, específicamente la variación de propiedades índice, clasificación USCS, densidad máxima seca y degradación del módulo resiliente. Este estudio resalta la fuerte dependencia del módulo resiliente con respecto al contenido de agua del suelo debido al carácter parcialmente saturado inherente a los materiales.

Palabras clave: Subrasante, arcilla, ceniza volante, residuos producto de combustión del carbón (rpcc), módulo resiliente

1. Introducción

Las plantas de generación termoeléctrica constituyen una fuente fundamental de energía en gran cantidad de países, o al menos un respaldo secundario importante. Dentro de las termoeléctricas, aquellas que usan carbón como combustible principal producen residuos de ceniza, genéricamente denominados residuos producto de combustión de carbón (RPCC). El carbón mineral es una roca de origen orgánico, de tipo sedimentario o metamórfico y, según el proceso de formación, puede catalogarse como turba, lignito, hulla (roca sedimentaria) o antracita (roca metamórfica) (Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética, 2012).

Como ejemplos, en Colombia la producción de RPCC es cercana a 800.000 Ton/año (Cárdenas, 2013). Entre tanto, en Chile durante el 2017 las termoeléctricas con tecnología de carbón fueron las mayores productoras de energía eléctrica, con una participación del 40%, equivalente a 29688 GWh (Asociación de generadoras

de Chile, 2018), y se estima que una planta de 1000 MW puede generar 200 000 toneladas de RPCC al año (Revista electricidad, 2013). Debido a que no todo el residuo tiene uso potencial como adiciones (ACI committee 232, 2002) o como agregado liviano para concreto (Videla y Martínez, 2001), gran parte queda acopiado como terraplenes o en patios adyacentes a las propias centrales termoeléctricas. Dicho acopio genera riesgo de contaminación sobre los cuerpos de agua cercanos y aguas subterráneas, al igual que polución por material particulado debido a su baja densidad y fácil transporte por viento.

Debido a su proximidad directa, los RPCC fácilmente entran en contacto con la propia infraestructura vial interna y adyacente a las plantas termoeléctricas, pero el efecto que tiene la contaminación por RPCC sobre el deterioro físico de dicha infraestructura, específicamente el comportamiento de las estructuras de pavimento, es incierto. La presente investigación estudia el módulo resiliente (M_r) de dos materiales base (arcilla y RPCC) y de sus mezclas en proporciones variables, con el objetivo de cuantificar en laboratorio la degradación del módulo ante la presencia de RPCC. Este estudio permite entonces simular el deterioro de una subrasante arcillosa ante contaminación con RPCC, como es el caso de vías en inmediaciones de plantas termoeléctricas y sitios de acopio de RPCC.

¹ Autor de correspondencia:

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, COLOMBIA
E-mail: jlarrahondo@javeriana.edu.co



2. Antecedentes

El módulo resiliente se define como la relación entre el esfuerzo desviador total y la deformación axial en una prueba triaxial cíclica. En suelos finos, el módulo resiliente se ve influenciado principalmente por el contenido de agua del suelo (NCHRP 2000), la densidad (Rondón, 2015) y el tipo de compactación (Rondón, 2015). El uso del módulo resiliente como variable ingenieril tiene su origen en los trabajos de (Rondón, 2015).

Estudios previos con mezclas de suelos finos (SF) y RPCC, adicionados con cementantes o estabilizantes, han abordado diferentes propiedades físicas y mecánicas. (Yarbaşı et al., 2007) analizan tres tipos de aditivos, respectivamente humo de sílice + limo, ceniza volante + limo y "lodo rojo" + cemento. (Camacho et al., 2006) evalúan el comportamiento de una arcilla expansiva (bentonita) utilizando adiciones individuales de ceniza volante, cal y aceite sulfonado. Adicionalmente, en 2016, el Instituto Mexicano del Transporte publica el documento técnico "Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación".

En la presente investigación se caracteriza físico-químicamente un suelo fino (SF) tipo arcilla y un RPCC y se estudia el comportamiento mecánico de los materiales base y sus mezclas.

3. Materiales y metodología

3.1 Materiales base

El suelo fino (SF) usado correspondió a una arcilla para fabricación de mampostería, cuya fuente se encuentra en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca (Colombia). La arcilla se obtiene de minas a cielo abierto y, para este estudio, las muestras se obtuvieron de los patios de acopio temporal. La ceniza (RPCC), proveniente de la combustión de carbón, fue tipo C y se obtuvo de la Central Termoeléctrica Termozipa Martín del Corral, en Tocancipá, Cundinamarca (Colombia).

3.2 Mezclas de suelo fino con RPCC

Los materiales SF y RPCC se secaron al horno a temperaturas de 110° y 60°C respectivamente, este último con el fin de minimizar la deshidratación de la cal, componente de la ceniza tipo C. A 24 y 48 horas respectivamente, se cuartearon el SF y los RPCC de acuerdo a lo indicado en la norma técnica colombiana INV E104-13 (Método B). Para los ensayos de módulo resiliente, no se maceró el SF, con el fin de aproximar una condición realista de mezcla entre SF y RPCC. Se prepararon tres mezclas con proporciones en masa de 10%, 20% y 40% de RPCC, en cantidad aproximada de 25 kg para cada muestra, correspondiente a la masa de cada uno de los ensayos por triplicado. Una vez preparados los materiales base y sus mezclas, se colocaron en doble bolsa herméticamente sellada y se depositaron en cuarto de curado con el fin de evitar la pérdida de sólidos y humedad.

3.3 Propiedades físicas

Se midieron propiedades índice para los cinco materiales de estudio, a saber: SF, RPCC y sus tres mezclas (10%, 20%, 40% RPCC). Específicamente, se midió granulometría por hidrómetro (norma INV E-123-13), límites

de consistencia (INV E-125-13 y INV E-126-13) y gravedad específica (INV E-128-13). Adicionalmente, la humedad óptima y peso unitario seco máximo a usar en los ensayos de módulo resiliente (M_r), se halló mediante el ensayo de compactación estándar (INV E-141-13) para cada uno de los materiales. Finalmente, se determinó el área de superficie específica (m^2/g) de cada material mediante la técnica de azul de metileno (INV E-182-13). Para calcular el área de superficie específica se usó la (Ecuación 1) adaptada de (J C Santamarina et al., 2002):

$$S_s = \frac{1}{MM_{mb}} \frac{M_{mb}}{V_{mb}} N \Delta V_{mb} A_v A_{mb} \frac{1}{M_s} \quad (1)$$

en donde S_s = área de superficie específica (m^2/g), MM_{mb} = masa molar del azul de metileno = 319.87 g/mol, M_{mb} = masa de azul de metileno disuelta para el ensayo = 10 g, V_{mb} = volumen de la solución de azul de metileno para el ensayo = 1000 mL, N = número de adiciones de azul de metileno previo para obtener la aureola, ΔV_{mb} = volumen de azul de metileno en cada adición = 5 mL, A_v = número de Avogadro = 6.02×10^{23} , A_{mb} = área que ocupa una molécula de azul de metileno = $130 \text{ \AA}^2/\text{molécula}$, y M_s = masa de suelo = 30 g.

3.4 Propiedades químicas y mineralógicas

3.4.1 Mineralogía mediante difracción de rayos X (DRX)

DRX es un ensayo para el análisis cualitativo de las fases minerales cristalinas de cualquier tipo de geomaterial, el cual se realiza mediante dos métodos principales: muestras orientadas para identificar minerales de arcilla y polvo desorientado para cualquier mineral (incluyendo el RPCC). El método se basa en la interacción de los rayos X y la mineral cristalino que produce la difracción (Moore y Reynolds, 1997). Las muestras se trituraron hasta un tamaño de partícula $<45 \mu m$, y las DRX se realizaron en los laboratorios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Bogotá, Colombia.

3.4.2 Microscopio electrónico de barrido (MEB/SEM)

El ensayo permite caracterizar visualmente la microestructura de la muestra a altas magnificaciones para materiales orgánicos e inorgánicos, suministrando información sobre textura, tamaño y forma de grano. Su funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre la microárea de estudio, mientras en un monitor se reconstituye la imagen sub-milimétrica capturada por un sensor. Las imágenes se obtuvieron con el microscopio electrónico de barrido del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, usando 30 kV de voltaje con la técnica de electrones secundarios. En total, se capturaron 29 imágenes, las cuales se encuentran completas en (Zambrano et al., 2017).

3.4.3 Carbono orgánico total (COT/TOC)

Es uno de los parámetros en el estudio de la calidad del agua con respecto a compuestos orgánicos, dado que incluye todos los compuestos del carbono en una sola masa. El ensayo se realizó para tres muestras de RPCC y se

SPANISH VERSION.....

determinó con apoyo de un equipo TOC-L-Shimadzu (Maryland, EEUU), disponible en el laboratorio de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá, Colombia.

3.4.4 Concentración de metales pesados

Por seguridad operativa y caracterización química del RPCC, sobre una muestra se midió la concentración de metales pesados mediante el procedimiento característico de toxicidad de lixiviado (TCLP), según procedimiento EPA 1311. La prueba se llevó a cabo en los laboratorios de la firma ChemiLab en Bogotá, Colombia.

3.5 Propiedades mecánicas: Módulo Resiliente (M_r)

3.5.1 Elaboración de probetas

De acuerdo con lo mencionado en la norma colombiana INV E-153-13 sobre el ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos, se prepararon muestras a relación 1:2, de 7 cm de diámetro y 14 cm de altura. La densidad seca y contenido de humedad a adoptar en las muestras fueron la máxima y óptima, respectivamente, obtenidas mediante el ensayo de compactación estándar (INV E-142-13). El material se almacenó en cuarto de curado por 24 horas antes de la preparación de las probetas. Para la elaboración de las muestras se utilizó un cilindro metálico de diámetro 7 cm y altura 20 cm. Para su compactación se utilizó carga monótonica, en lugar de compactación dinámica, mediante prensa Marshall (Figura 1). Una vez compactadas las muestras, se retiraron del cilindro mediante gato hidráulico, minimizando así la alteración de las probetas (Figura 1).

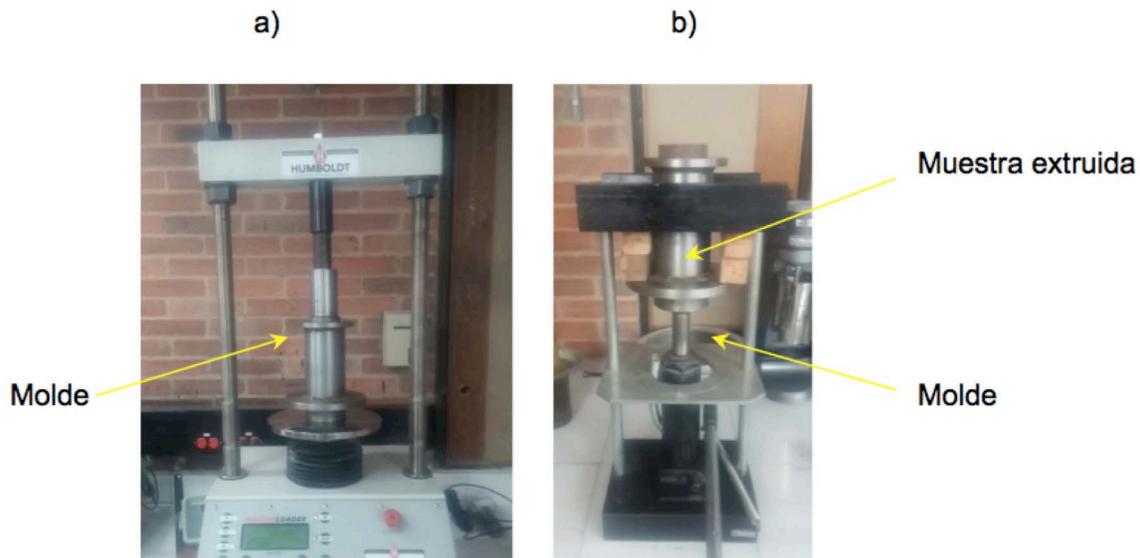


Figura 1. Compactación (a) y extrusión (b) de las muestras del molde tras prensado Marshall

3.5.2 Ensayo de módulo resiliente

De acuerdo con lo descrito en la norma INV E-156-13, las probetas se sometieron a ciclos de carga axial, usando el equipo EDS de compresión triaxial cíclica de la Facultad de Ingeniería en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (Figura 2). El módulo resiliente corresponde a la relación

entre el esfuerzo total y la deformación axial. Cada prueba comprendió 17 ciclos, donde el primero fue de ajuste, los siguientes 15 ciclos correspondieron a la ejecución del ensayo de módulo resiliente y el ciclo 17 (final) fue la falla a compresión monótonica. En series de cinco ciclos se varía el esfuerzo axial y la presión de cámara.



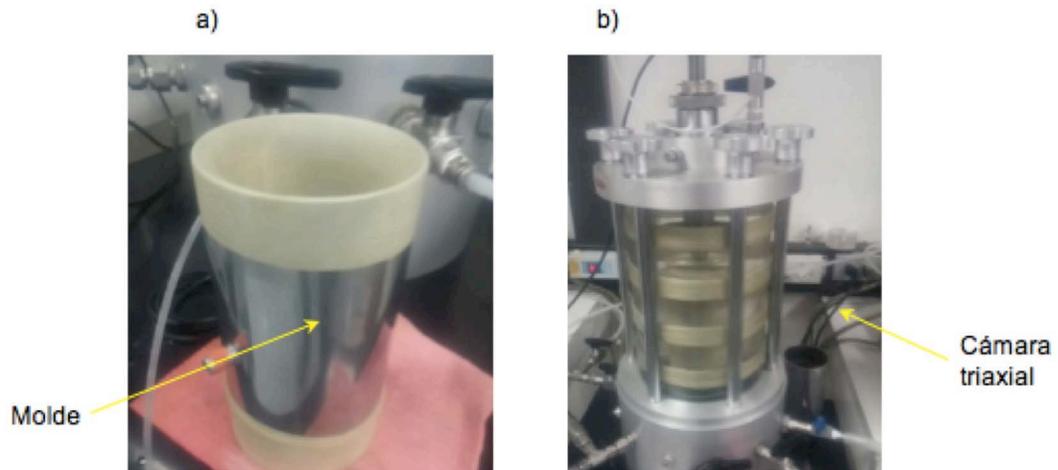


Figura 2. Montaje para medición de módulo resiliente en cámara de compresión triaxial

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización física

La (Figura 3) presenta los resultados de límite líquido (LL) y límite plástico (LP) de las mezclas en función del contenido de RPCC (cada dato graficado corresponde al

promedio; las barras representan la magnitud de la desviación estándar de los resultados). Se evidencia la consistente disminución del LL con el incremento de RPCC. El material con 100% RPCC resultó “no plástico”. Por otra parte, los resultados muestran incrementos en LP con adiciones de RPCC de 10% y 20% respectivamente, pero descenso con 40% RPCC.

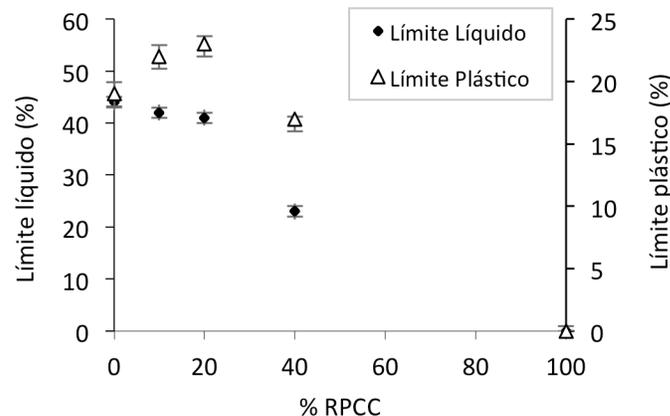


Figura 3. Variación del límite líquido y límite plástico con el contenido de RPCC

La (Figura 4) representa la variación del índice de plasticidad y límite de contracción del material con el incremento en RPCC. Se observa que ambos índices tienen una tendencia inversamente proporcional con respecto al contenido de RPCC. El índice de plasticidad presentó una

disminución probablemente debido a la variación granulométrica del material y la ausencia de plasticidad en el RPCC. Se observa que, a 40% y 100% de RPCC, la mezcla muestra límite de contracción cero.

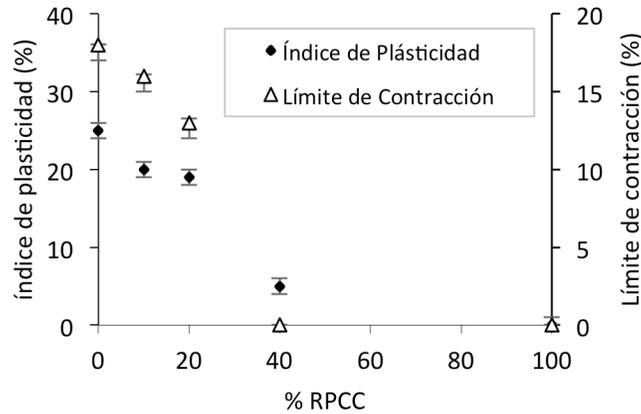


Figura 4. Variación del índice de plásticidad y límite de contracción del suelo fino con la adición de RPCC

La (Figura 5) muestra la variación de la clasificación USCS del material para las diferentes proporciones de RPCC. Se observa que el suelo fino original (SF) corresponde a una

arcilla de baja plásticidad tipo CL. La misma clasificación se mantiene aún con la inclusión de hasta 20% RPCC, pero al alcanzar 40%, el material clasifica como suelo CL-ML.

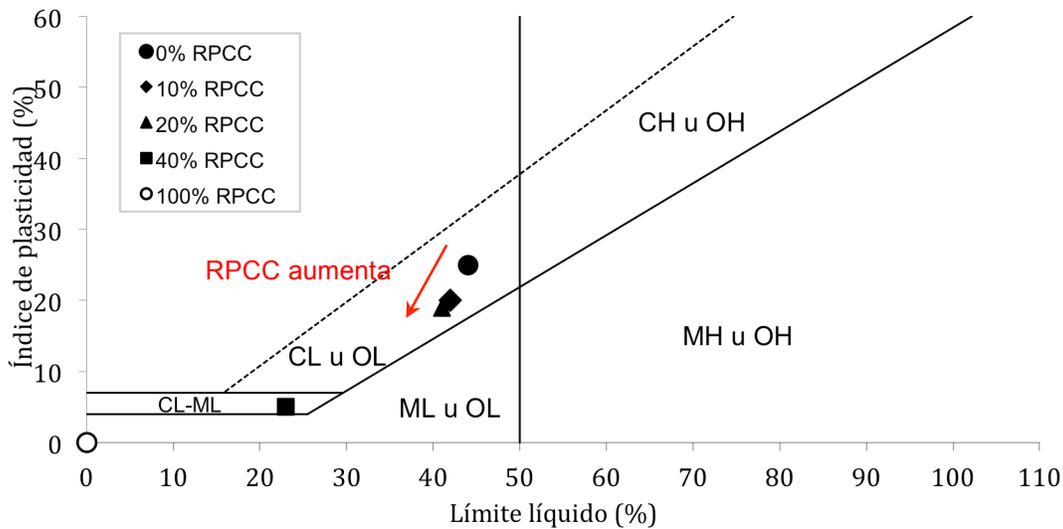


Figura 5. Carta de plásticidad de Casagrande: variación de la clasificación USCS con el contenido de RPCC

El ensayo de azul de metileno mostró satisfactoriamente aureolas en el momento en que la arcilla se saturó químicamente con el azul de metileno (Figura 6). En cuanto al área de superficie específica (Figura 7), para la arcilla intacta (0% RPCC) se estimó en 42 m²/g, mientras que

para la ceniza (100% RPCC) el valor es 11 m²/g. Se observó también que, a menor área de superficie específica, menor límite de contracción, ya que la capacidad del material para absorber agua disminuye a medida que aumenta el contenido de RPCC (J C Santamarina et al., 2002).



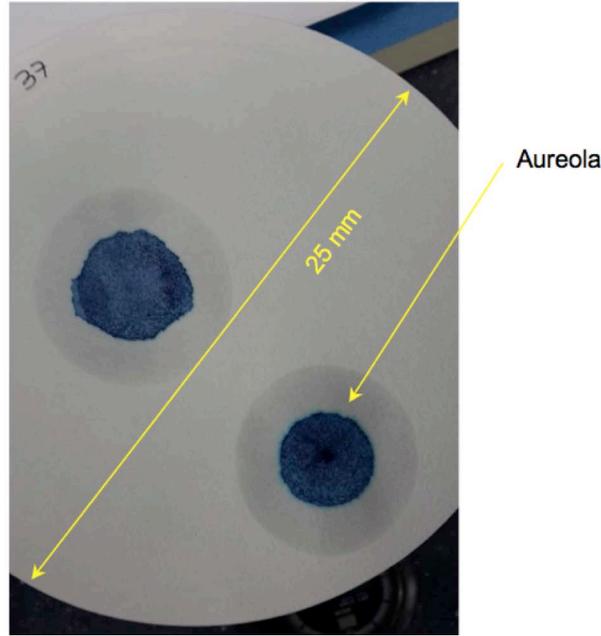


Figura 6. Desarrollo de aureola durante el ensayo de azul de metileno

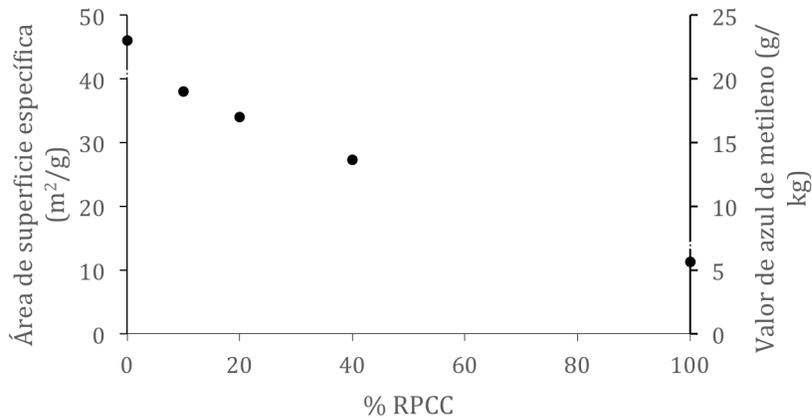


Figura 7. Resultados de valor de azul de metileno y área de superficie específica

En la (Figura 8) se evidencian los resultados de gravedad específica de sólidos, observándose que esta propiedad disminuye consistentemente con el aumento de la proporción de RPCC. Esta tendencia es similar a la reportada por (Pérez, 2012), donde se mezclaron arcilla con clasificación CH y cenizas tipo F en proporciones de 0%, 20%, 40% y 100% de ceniza.

Para el presente trabajo, la gravedad específica promedio de la ceniza (100% RPCC) es 2.09. Según lo reportado por ACI, la densidad de las partículas sólidas de ceniza volante oscila entre 1.97 y 3.02 Mg/m³ (ACI committee 232. American Concrete Institute, 2002). Las cenizas volantes en general muestran relativamente bajas densidades de partículas sólidas si tienen altos contenidos de carbono.

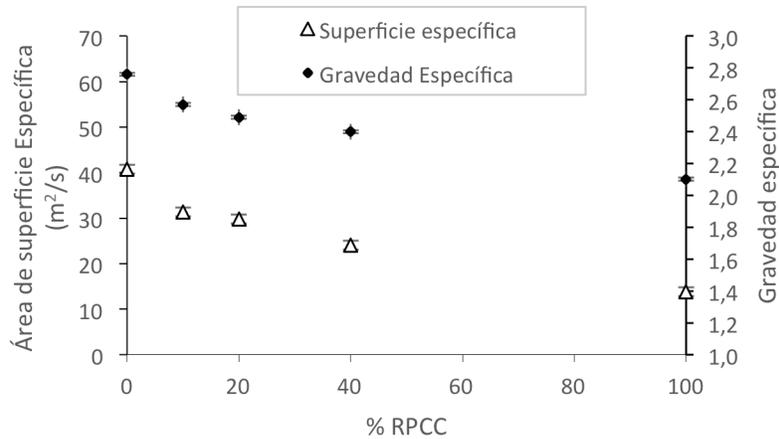


Figura 8. Variación de gravedad específica y área de superficie específica con adición de RPCC

De acuerdo con los resultados de distribución granulométrica, en general el aumento de RPCC causa un incremento en el diámetro medio (D_{50}) de la distribución del material (Figura 9) y (Tabla 1), excepto para la adición del

10%. Es posible que las fuerzas electro-químicas debidas a la interacción entre el dispersante del ensayo de hidrómetro y el RPCC hayan afectado los resultados, aunque se requiere más investigación para confirmar esta hipótesis.

Tabla 1. Variación del tamaño medio (D_{50}) con el aumento de RPCC

%RPCC	D_{50} (micras)
0	5.2
10	3.8
20	8.3
40	16
100	80

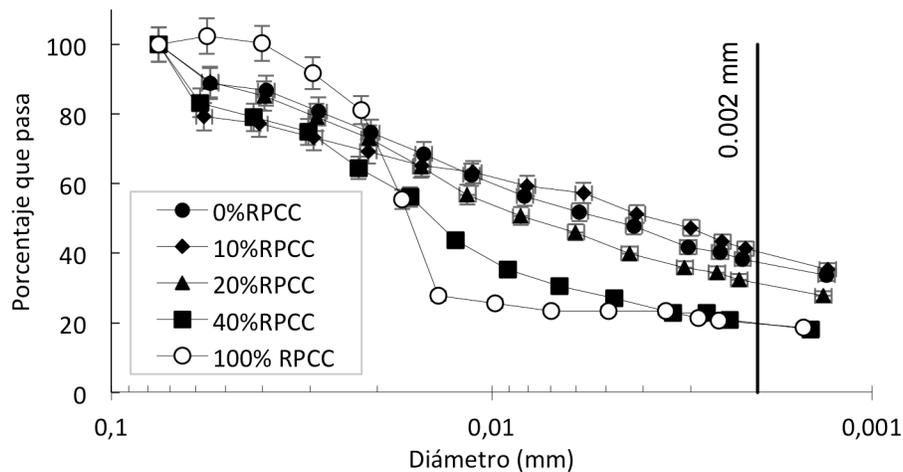


Figura 9. Variación de la granulometría del material con la adición de RPCC. La línea vertical indica la frontera granulométrica entre tamaños limo y arcilla (0,002 mm)



Finalmente, en la (Figura 10) se muestran los resultados de las curvas de compactación para los cinco materiales en estudio. Se observa que el peso unitario seco máximo disminuyó en 30% con el aumento a 40% en RPCC. Comparando con lo reportado por (Pérez, 2012), quien mezcló suelo fino con peso unitario seco de 16 kN/m³ y ceniza volante de 15 kN/m³, el peso unitario seco de la

mezcla pasó de 16 a 16.2 kN/m³, y con 40% de ceniza volante se observó un aumento del 0.6%. Es de resaltar que, en dicho estudio, el suelo fino y la ceniza volante se secaron al horno a 60°C y se realizó ensayo modificado de compactación; entre tanto, en la presente investigación, el suelo se secó a 110°C y se realizó ensayo de compactación estándar.

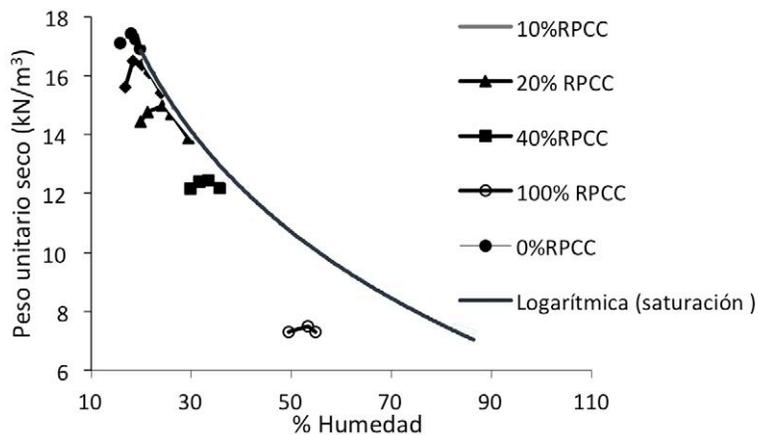


Figura 10. Curvas de compactación (la curva de saturación es para 0% RPCC)

4.2 Caracterización química y mineralógica de los materiales y las mezclas

En la (Tabla 2) se muestran los valores obtenidos del

ensayo de TCLP realizado al RPCC. Todas las concentraciones de metales pesados estuvieron por debajo del límite de detección.

Tabla 2. Resultados de TCLP

Ensayo	Resultado (mg/L)
Arsénico total	<0,010
Bario total	<0,50
Cadmio total	<0,05
Cromo total	<0,1
Estaño total	<1
Litio total	<0,150
Mercurio total	<0,002
Plomo total	<0,5
Selenio total	<0,005
Vanadio total	<2
Zinc total	<0,05

Como parte de la caracterización textural y mineralógica, en la (Figura 11) se observan imágenes típicas del RPCC a la microescala, obtenidas con microscopio electrónico de barrido, en las cuales se aprecian tamaños y formas de partícula. La morfología resultante de las partículas puede separarse como: cenosferas (partículas esféricas macizas o huecas), plerosferas (partículas esféricas huecas que contienen otras esféricas de menor tamaño) y partículas irregulares o alargadas.

Usando las fotografías, se midieron los diámetros de partícula representativos, encontrando tamaños inferiores a

75 micras y de hasta 171 micras. Este resultado es consistente con estudios previos (Peña y Ortega, 2014), donde se afirma que las cenizas volantes tienen partículas inferiores a 75 y de hasta 250 micras. La variación de la morfología superficial depende de la velocidad y temperatura de combustión del carbón, el grado de pulverización de la ceniza y el tipo de carbón (ACI committee 232. American Concrete Institute., 2002). Las partículas irregulares y angulosas se pueden asociar a minerales que no hicieron combustión completa, como el coque.

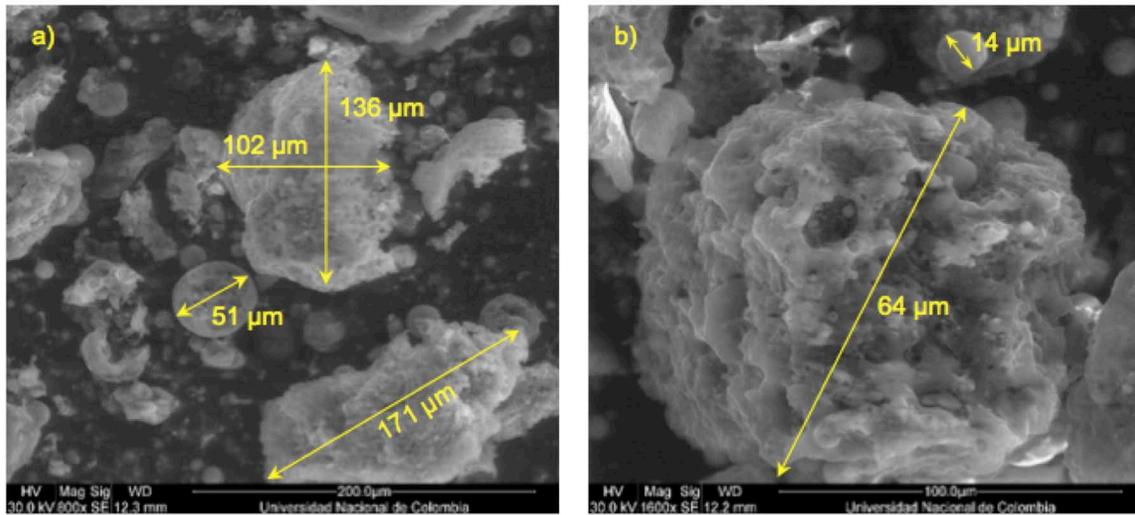


Figura 11. Fotografías de microscopio electrónico de barrido del RPCC: a) 800x, b) 1600x

En la (Tabla 3) se muestran los resultados de contenido carbono orgánico total de una muestra del RPCC. Dado que el contenido promedio de carbono es 12.5%, los

resultados sugieren que la eficiencia de la combustión en la planta termoeléctrica es cercana al 87.5%.

Tabla 3. Resultados de Carbono Orgánico Total (TOC)

Muestra	Peso muestra (mg)	mg C	%Carbono
1	38.0	4.571	12.0
2	38.5	4.862	12.6
3	35.0	4.493	12.8

Finalmente, los resultados de difracción de rayos X (DRX) ejecutada sobre muestras de arcilla (0% RPCC) y ceniza (100% RPCC) aparecen en la (Figura 12), (Figura 13), (Figura 14), (Figura 15) y (Figura 16). De estas figuras, la (Figura 12), (Figura 13), (Figura 14), (Figura 15) aplican a la arcilla (SF) y presentan los difractogramas resultantes de la técnica de muestra orientada para identificación de minerales de arcilla. Por su parte, la (Figura 16) aplica al RPCC y corresponde al difractograma del método de polvo desorientado.

Los minerales de arcilla que predominan en el suelo fino de este estudio son caolinita e illita, los cuales son minerales tipo 1:1 y 2:1, respectivamente. El espacio interbasal mide aproximadamente 7 Å en caolinitas y 10 Å en illitas. En las primeras, las capas se unen mediante puentes de

hidrogeno, mientras que en las segundas la estructura se estabiliza con cationes de potasio (Bartolome, J. F., 1997). Tanto los puentes de hidrógeno como el cierre con potasio promueven baja absorción de agua y baja susceptibilidad a la retracción, indicando que ambos minerales de arcilla presentan cambios de volumen muy bajos ante hidratación. Por otra parte, los resultados en la arcilla muestran que el mineral no arcilloso dominante es cuarzo (espaciamento $d \approx 3.34$ Å).

En el RPCC, los resultados de DRX indican que el mineral predominante es cuarzo (mayor a 50%), con trazas del óxido de hierro hematita. En general, el cuarzo se encuentra presente en todas las cenizas volantes, resultado de las impurezas del carbón (ACI comittee 232. American Concrete Institute., 2002).

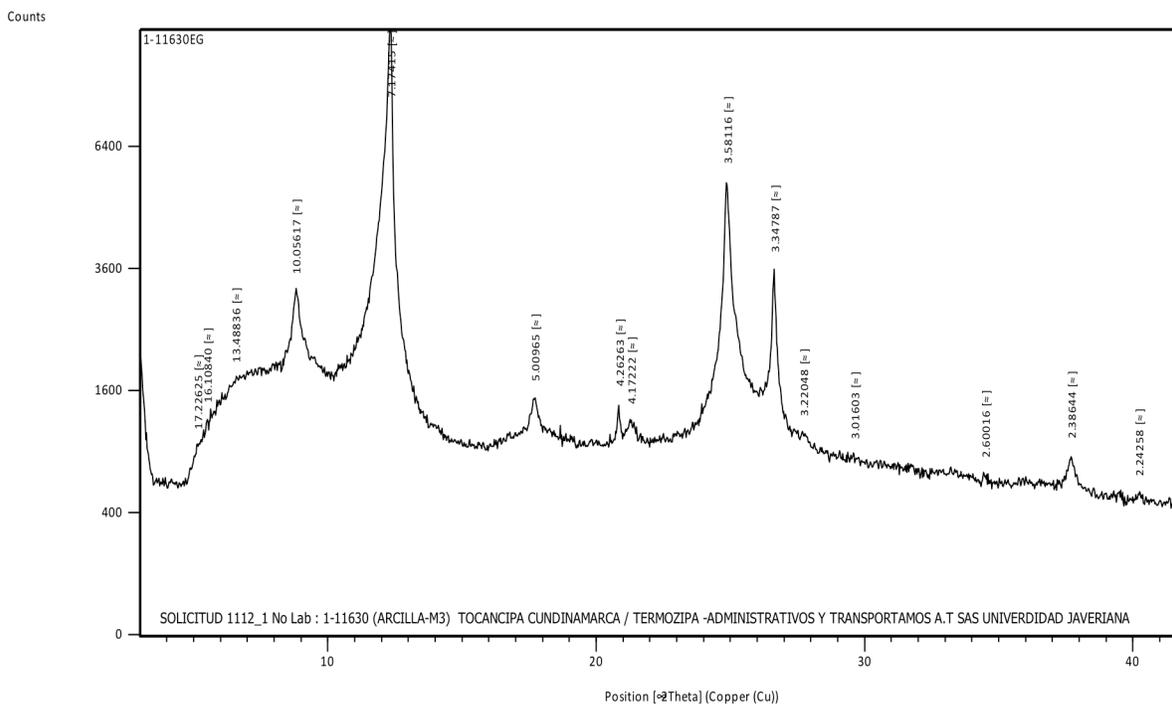


Figura 12. Difractograma de SF con etilenglicol

SPANISH VERSION.....

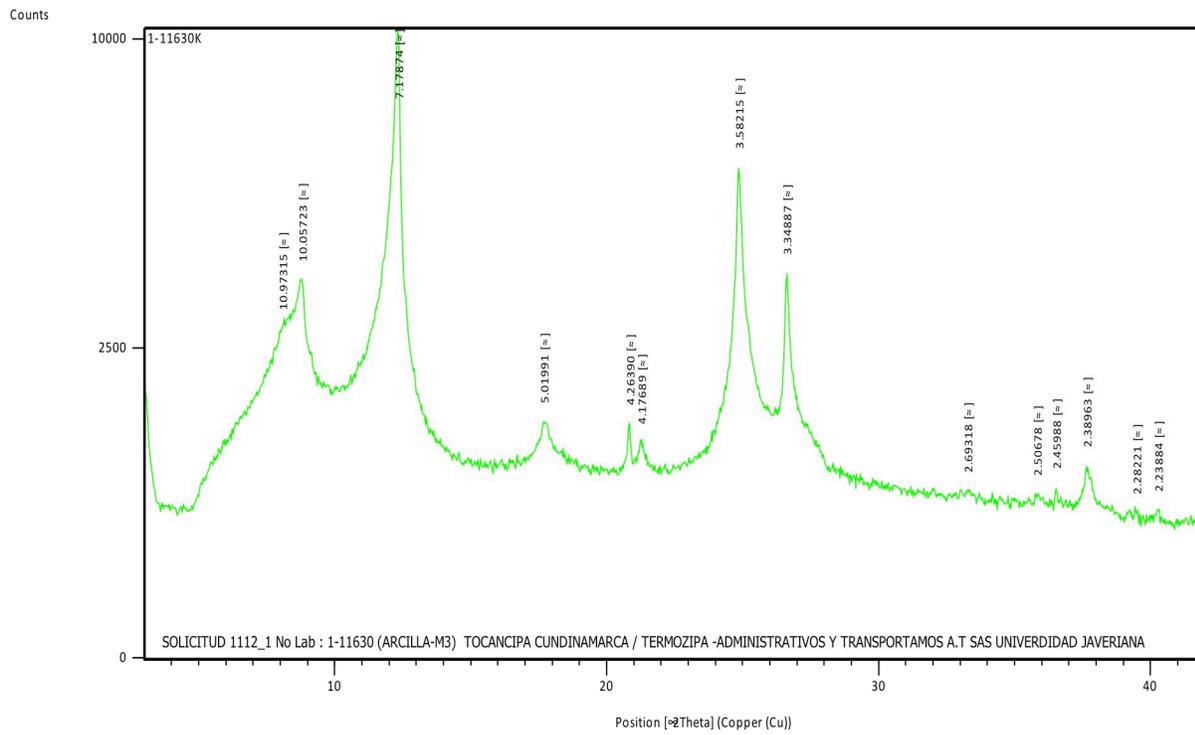


Figura 13. Digractograma de SF con potasio (K)

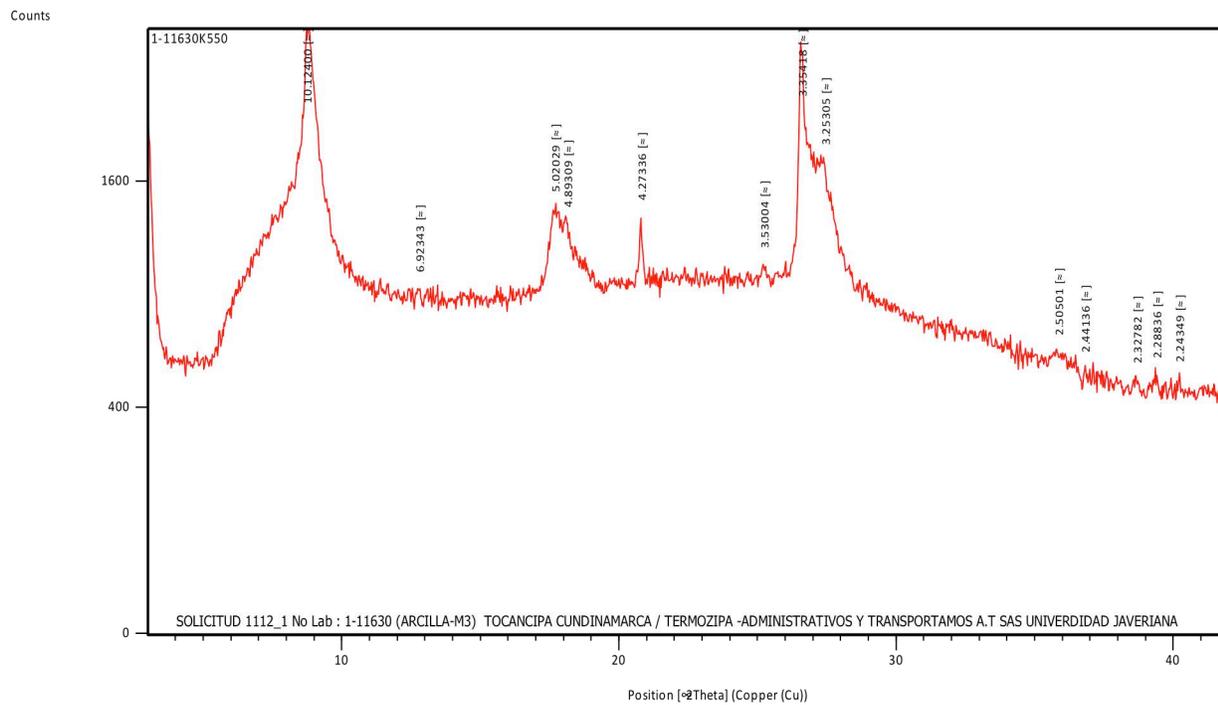


Figura 14. Difractograma de SF a 550°C



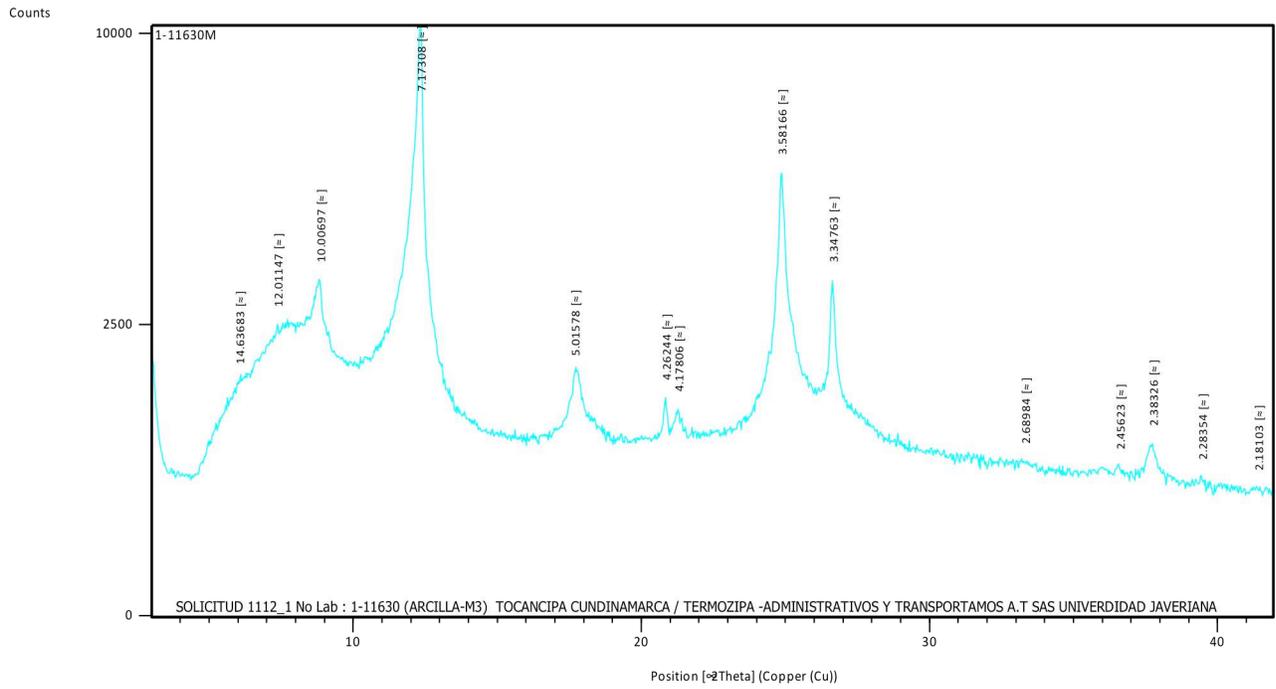


Figura 15. Difractograma de SF con magnesio (Mg)

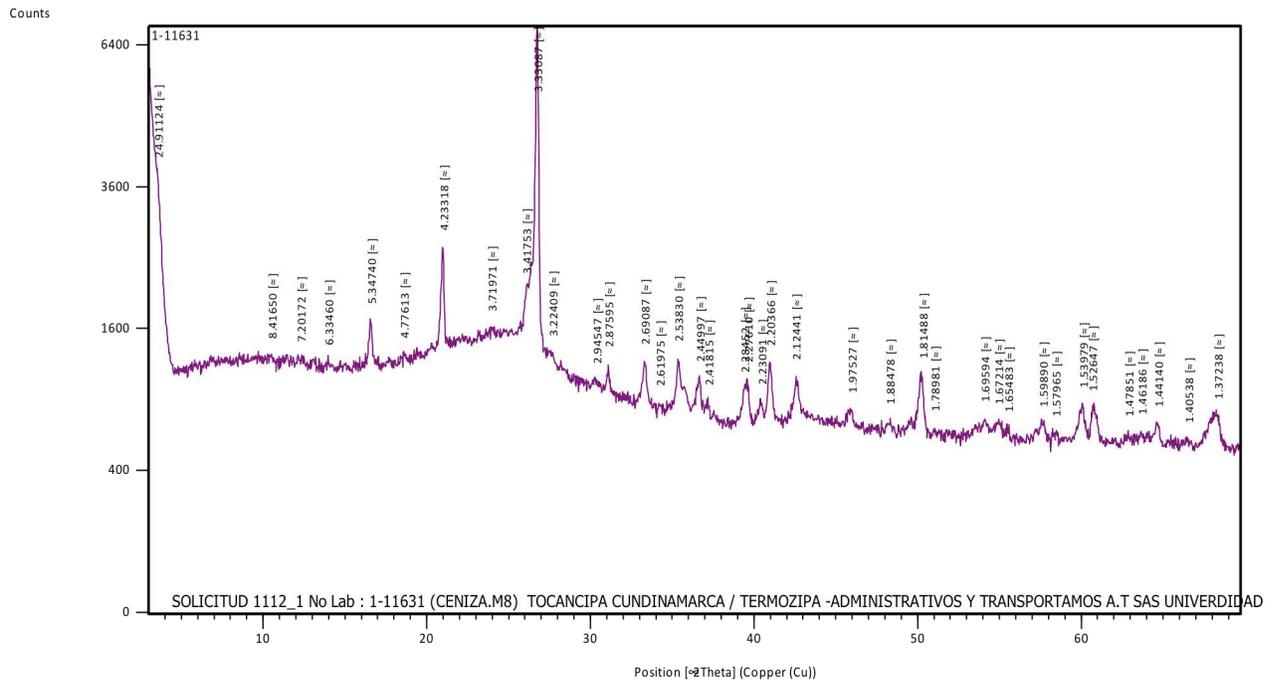


Figura 16. Difractograma del RPCC

SPANISH VERSION.....

4.4 Caracterización mecánica: módulo resiliente (M_r) de los materiales base y sus mezclas

En la (Figura 17), (Figura 18) y (Figura 19) se observan los resultados de módulo resiliente en función del esfuerzo desviador, para tres diferentes esfuerzos de confinamiento y

para cada uno de los cinco tipos de materiales según el contenido de RPCC. Los resultados se grafican como promedio más/menos desviación estándar. Como se indicó arriba, cada resultado de M_r corresponde a 15 ciclos de esfuerzo total desviador.

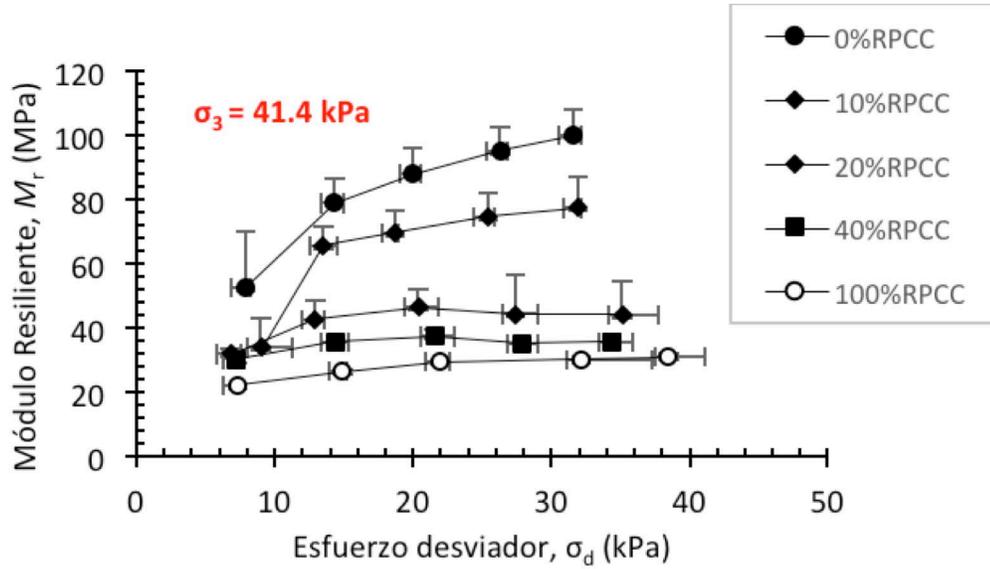


Figura 17. Variación del M_r a esfuerzo de confinamiento 41.4 kPa

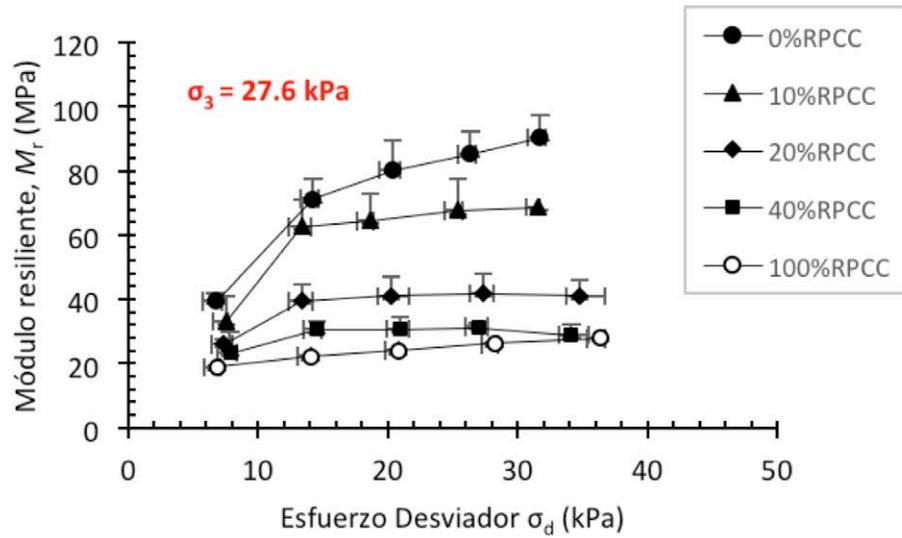


Figura 18. Variación del M_r a esfuerzo de confinamiento 27.6 kPa

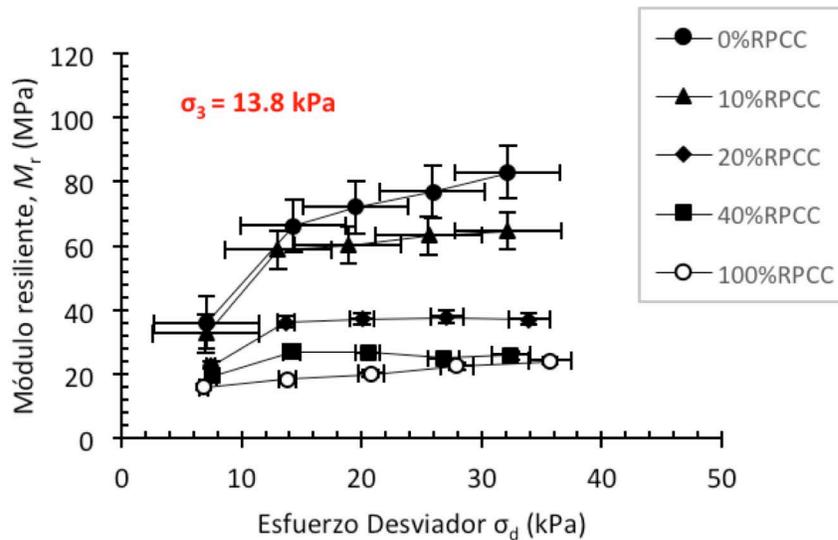


Figura 19. Variación del M_r a esfuerzo de confinamiento 13.8 kPa

4.4.1 Módulo resiliente del suelo fino (SF)

En general, el M_r de un suelo no es una propiedad constante, ya que depende de la densidad, el contenido de agua y el método de compactación (NCHRP, 2000) (Instituto Mexicano del Transporte 2016) (Rondón y Reyes, 2015). Los

resultados obtenidos en esta investigación (Figura 17) (Figura 18) y (Figura 19) evidencian aumento del M_r con el incremento del esfuerzo desviador (σ_d) y con el aumento del esfuerzo de confinamiento (σ_3). La (Tabla 4) resume los resultados obtenidos.

Tabla 4. Resumen de resultados de módulo resiliente

Material	Peso unitario seco máximo (kN/m^3)	Contenido de agua (%)	M_r (MPa)	
			Mínimo	Máximo
SF 100% + 0% RPCC	17.4	17.9	40	91
SF 90% + 10% RPCC	16.4	18.4	33	69
SF 80% + 20% RPCC	14.9	24.2	26	35
SF 60% + 40% RPCC	12.4	33.4	24	34
SF 0% + 100% RPCC	7.5	53.3	19	36

De acuerdo con lo reportado por (Instituto Mexicano del Transporte, 2016) a partir de 14 muestras de suelo clasificadas como limo y arcilla, el M_r disminuye con el incremento del esfuerzo desviador y aumenta con el incremento del esfuerzo de confinamiento. Así mismo, numerosos investigadores citados por (Rondón y Reyes, 2015)

reportan que el M_r de suelos finos en general disminuye con el incremento del esfuerzo desviador.

El incremento del M_r con el esfuerzo desviador en la presente investigación, aunque contrario a la tendencia reportada por otros investigadores, es consistente en múltiples ensayos, y puede explicarse como sigue:

SPANISH VERSION.....

- La densidad seca máxima en el presente estudio es alta, comparada con estudios previos (Rondón y Reyes, 2015). También, los valores de referencia para arcillas como las estudiadas por Pérez y Garnica (Instituto Mexicano del Transporte, 2016) se encuentran entre 10 y 15 kN/m³, mientras que para este estudio es 17.4 kN/m³. En efecto, éstos y otros investigadores reportan que el M_r de suelos cohesivos aumenta con el peso unitario (NCHRP, 2000).
- El contenido de agua afecta el resultado, ya que para el caso del presente trabajo es 17.9% para la arcilla, mientras que para Pérez y Garnica (Instituto Mexicano del Transporte, 2016) se encuentra entre 24 y 36%. Otros investigadores (Rondón y Reyes, 2015) muestran que M_r aumenta cuando el contenido de agua es inferior al óptimo y viceversa. Al estudiar el efecto sobre el M_r de las variaciones de contenido de agua con respecto al óptimo para tres suelos tipo CL y CH, estos investigadores encontraron que el M_r aumenta hasta un 200% cuando se compacta por debajo del óptimo.
- El efecto del contenido de agua se puede entender cualitativamente teniendo en cuenta que los materiales objeto del presente estudio son parcialmente saturados, por lo cual sus presiones de poros son negativas, implicando succión entre las partículas de arcilla. Este efecto aumenta los esfuerzos efectivos y mejora la rigidez global de las probetas.
- El método de compactación en la presente investigación es estático, lo que induce que el acomodamiento de las partículas de suelo sea más uniforme, obteniendo esfuerzos normales y cortantes distintos a los obtenidos por compactación

dinámica (Secretaría de Comunicaciones y Transportes & Instituto Mexicano del Transporte, 2001).

- Finalmente, el método de preparación de muestras es un factor que pudo haber incidido en los resultados, ya que la granulometría del material, al momento de recibirlo de la fuente, mostraba agregaciones gruesas de hasta 5 mm de diámetro. Las muestras para determinación de propiedades índice fueron maceradas, pero no para la preparación de las mezclas de SF y RPCC. Así, es posible que durante la preparación de muestras para compactación y módulo resiliente, no se hayan hidratado completamente todas las partículas de los materiales. Lo anterior pudo causar que el contenido de agua resultara menor que el reportado por otras investigaciones (Instituto Mexicano del Transporte, 2016), incurriendo a su vez en succiones más elevadas.

Para evaluar la razonabilidad de los resultados, la (Figura 20) muestra una gráfica de M_r vs. σ_d / σ_3 para el suelo arcilloso (0% RPCC). A esta relación se puede aplicar la regresión potencial propuesta por (Instituto Mexicano del Transporte, 2016), y expresada como:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3} \right)^{k_2} \quad (2)$$

donde M_r = módulo resiliente (MPa), σ_d = esfuerzo desviador (kPa), σ_3 = esfuerzo de confinamiento (kPa), k_1 y k_2 = parámetros de ajuste. Los resultados de la regresión muestran $k_1 = 63.0$ MPa y $k_2 = 0.516$.

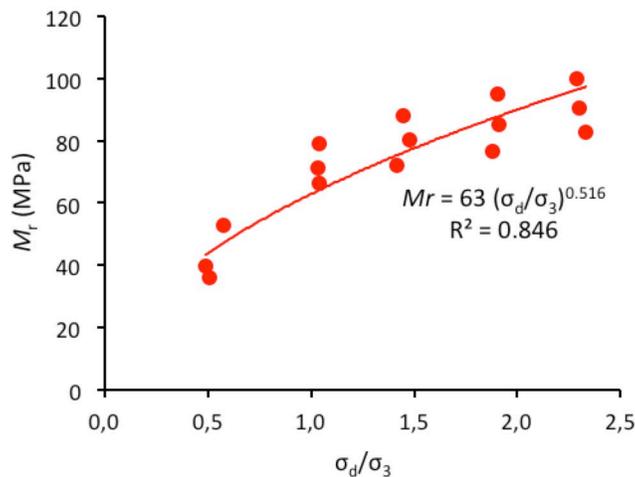


Figura 20. Ajuste de los resultados de módulo resiliente para el suelo fino (0% RPCC) usando el modelo de (Instituto Mexicano de Transporte, 2016)

Los rangos de parámetros para arcillas reportados por (Instituto Mexicano del Transporte, 2016) son: $k_1 = 88$ a 108 MPa, $k_2 = -0.139$ a -0.108 . Se observa que, aunque el valor calculado para k_1 es cercano a los reportados en la literatura, y la bondad del ajuste es razonable (Figura 20), el valor de k_2 muestra la tendencia contraria de M_r vs. σ_d/σ_3 resaltada anteriormente.

Teniendo en cuenta la gran relevancia que tiene el contenido de agua sobre los resultados de módulo resiliente, y que la tendencia resultante en la presente investigación es contraria a la de estudios previos, se llevó a cabo un ejercicio adicional aprovechando los datos originales del estudio (Instituto Mexicano del Transporte, 2016). Dicho estudio usa 35 muestras de suelo (14 arcillas, 12 limos y nueve suelos areno-arcillosos a areno-limosos) y, para todos los suelos, reporta límites de consistencia, fracción pasa tamiz 200, humedad óptima y grado de saturación. Con esta información, en el presente trabajo se ejecutó regresión lineal

múltiple para los parámetros k_1 y k_2 de la (Ecuación 2), encontrando:

$$k_1 = -32.68 + 2.78 LL + 0.0013 CF - 1.08 w_{opt} \quad (3)$$

$$k_2 = 0.460 + 0.00554 IP - 0.0212 S \quad (4)$$

donde: LL = límite líquido (%), CF = fracción pasa tamiz 200 (%), w_{opt} = contenido óptimo de agua de compactación (%), IP = índice de plasticidad (%), S = grado de saturación (%).

Sustituyendo la (Ecuación 3) y la (Ecuación 4) en la (Ecuación 2), y aplicando los resultados de propiedades índice obtenidos para la presente investigación en la arcilla (0% RPCC), la (Figura 21) muestra que esta nueva regresión aproxima razonablemente el promedio de los resultados de laboratorio.

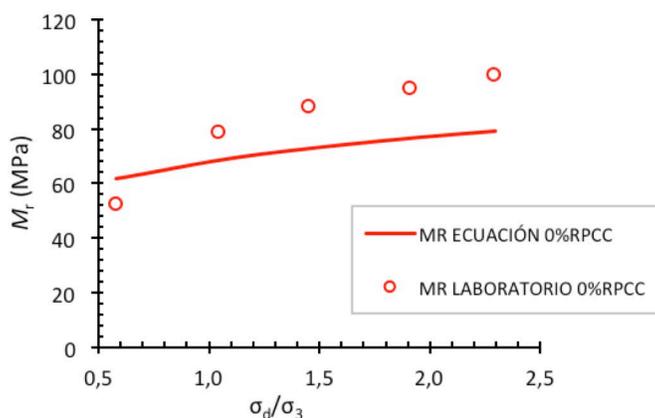


Figura 21. Comparación del promedio de resultados de laboratorio con el modelo de regresión lineal múltiple (SF con 0% RPCC)

4.4.2 Módulo resiliente del RPCC (Ceniza)

El M_r promedio obtenido para el RPCC estuvo entre 19 y 36 MPa. Las propiedades correspondientes del material fueron peso unitario seco máximo 7.7 kN/m^3 , humedad óptima 52%, granulometría variable en forma y tamaño (1 a 300 micras), mineralogía dominada por cuarzo y trazas de hematita, y textura principalmente vítrea (60-90% de la masa) con granos sólidos o huecos (Velandia et al., 2015). Por lo tanto, el material ensayado se asemeja más a un suelo granular suelto que a uno cohesivo, de manera que las partículas se mueven relativamente libres una con respecto a la otra. En la literatura técnica, no se encontraron datos de módulo resiliente que permitan comparar los resultados obtenidos.

4.4.3 Módulo resiliente de las mezclas de suelo fino y RPCC

El comportamiento del M_r entre los materiales con RPCC 0% y RPCC 10% es proporcional y las curvas son relativamente paralelas entre sí (Figura 17), (Figura 18) y (Figura 19). Sin embargo, a partir del 20% de RPCC, las curvas tienden a ser más paralelas a las de la ceniza. Este comportamiento está asociado con la disminución de la densidad seca máxima (Instituto Mexicano del Transporte, 2016) y a su vez con el incremento en el contenido de agua. El incremento en la demanda de agua de las mezclas se puede deber al aumento en la cantidad de RPCC (ACI committee 232. American Concrete Institute., 2002).

5. Conclusiones

El presente artículo simula el grado de deterioro mecánico de una subrasante arcillosa cuando se contamina con residuos producto de la combustión del carbón (RPCC), como es el caso en vías internas y adyacentes a plantas termoeléctricas a base de carbón o sitios de acopio de RPCC. Del estudio emanan las siguientes conclusiones:

Los límites de consistencia, el índice de plasticidad, el área de superficie específica y la gravedad específica disminuyen con el incremento en la proporción de RPCC. Lo anterior a su vez explica que la clasificación USCS de la mezcla cambie de CL a CL-ML cuando el contenido de RPCC llega al 40%. Al mismo tiempo, el parámetro granulométrico D₅₀ aumenta con la proporción de RPCC.

La tendencia resultante en el comportamiento del módulo resiliente (M_r) con respecto al esfuerzo total desviador (σ_d), opuesta a la reportada por estudios previos de otros investigadores, se puede explicar debido a los bajos contenidos de agua en los cinco materiales ensayados (todos

parcialmente saturados), los cuales ocasionan altas succiones, altos esfuerzos efectivos y elevadas rigideces. Otras razones para explicar la tendencia resultante incluyen las altas densidades secas máximas del presente estudio y el método de preparación de muestras.

La degradación del M_r del material con el aumento en la fracción de RPCC está asociado a la disminución de la densidad seca y al incremento relativo en el contenido de agua de las mezclas.

La información científica disponible con respecto a M_r en RPCC es casi inexistente, por lo cual la comparación de los datos del presente estudio con investigaciones previas no es trivial.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del programa de Maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Igualmente, agradecen el soporte logístico y financiero brindado por la firma A&T SAS a través de su gerente, Sr. Mario Chacón, quien suministró el RPCC y financió parcialmente el programa experimental.

7. Referencias

- ACI committee 232. **American Concrete Institute (2002)**. ACI 232.2R-96. Use of Fly Ash in Concrete. Comité ACI 232.
- Asociación de generadoras de Chile (2018)**. Reporte anual 2017 (p. 91). Chile: Asociación de generadoras de Chile.
- Bartolomé, J. F. (1997)**. El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio., 36(1), 7-19.
- Camacho Tauta, Javier Fernando; Reyes Ortiz, Oscar Javier; Mayorga Antolínez, Catalina; Méndez G., Dolly Fernanda (2006, agosto)**. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Universidad Militar Nueva Granada.
- Cárdenas, Gloria Lucia (2013)**. Utilización de desechos del carbón: CONSTRUIR A PARTIR DE LAS CENIZAS. Universidad del Valle, Agencia de Periodismo Científico. Recuperado de <http://aupec.univalle.edu.co/AUPEC/antiores/cenizas.html>
- Instituto Mexicano del Transporte (2016)**. Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética. (2012)** Cadena del carbón. UPME.
- Moore, Duane M.; Reynolds, Robert C. (1997)**. X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. 2nd Edition. Oxford University Press. 400 p.
- NCHRP (2000)**. Appendix DD-1: Resilient Modulus as Function of Soil Moisture- Summary of Predictive Models.
- Peña Rodríguez, Gabriel; Ortega Triana, Luis Rene (2014)**. Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. Revistas UPTC, 14(No. 2), 14-19.
- Pérez Collantes, Rocío del Carmen (2012)**. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos. Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Revista electricidad, grupo editorial Editec (2013, diciembre)**. Electricidad La revista energética de Chile. (No. 166). Recuperado de <http://www.revistaei.cl/reportajes/reutilizacion-de-residuos-el-valor-de-las-cenizas-termoelectricas?revista=66098#>
- Rondón Q, Hugo Alexander; Reyes Lizcano, Fredy Alberto (2015)**. Pavimentos, Materiales, Construcción y Diseño (1a ed.). Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Santamarina, J.C.; Klein, K. A.; Wang, Y. H.; Prencke, E. (2002)**. Specific surface: determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal, 39(1), 233-241.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte (2001)**. Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Sanfandila, Publicación Técnica No. 142.
- Velandia, Diego; Ramírez, Fernando; Carrillo, Julián (2015)**. Concretos con cenizas volantes provenientes de termoeléctricas (1a ed.). Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Videla, Carlos; Martínez, Patricia (2001, diciembre)**. Áridos livianos de cenizas volantes para la construcción con hormigón sustentable. Revista Ingeniería de Construcción, 16(2). Recuperado de https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/203/pdf_1
- Yarbaşı, Necmi; Kalkan, Ekrem; Akbulut, Suat (2007)**. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. Cold Regions Science and Technology, 48(1), 44-54.
- Zambrano V.; Diana M.; Solórzano R.; Carlos J. (2017)**. Evaluación del módulo resiliente de suelos finos con adición de residuos de la combustión del carbón (RPCC).

