

## **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE ESCORIA DE CARBÓN, PROVENIENTE DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

*C. Cea García <sup>1</sup>, R. King St-Onge <sup>2</sup> y J. Montenegro Cooper <sup>3</sup>*

### **RESUMEN:**

Chile, como país en vías de desarrollo, requiere de energía eficaz y económica para abastecer el crecimiento en los distintos sectores del país. Es por ello, que alternativas competitivas como lo es generar energía a través de la combustión de carbón, el cual es un combustible muy abundante en la corteza terrestre, se ha vuelto de suma importancia a nivel mundial. Las ventajas son que posee un costo relativo menor en comparación con otros combustibles fósiles y un factor de utilización muy alto. La inquietante es la reutilización de los subproductos derivados del proceso de combustión en una termoeléctrica, los cuales se pueden clasificar en cenizas y escoria.

Para ello, el presente informe entrega una caracterización geotécnica de escoria de carbón proveniente de una central termoeléctrica situada en la Región del Biobío, con el fin de determinar sus potenciales usos en la Ingeniería Civil.

**PALABRAS CLAVES:** Termoeléctrica; Escoria.

### **ABSTRACT:**

Chile, as a developing country, requires efficient and economic energy to supply growth in the different sectors of the country. That is why competitive alternatives such as generating energy through the combustion of coal, which is a very abundant fuel in the earth's crust, has become of great importance worldwide. The advantages are that it has a relatively lower cost compared to other fossil fuels and a very high utilization factor. The disturbing one is the reuse of the byproducts derived from the combustion process in a thermoelectric, which can be classified into ash and slag.

This report provides a geochemical and geotechnical characterization of the slag from a thermoelectric plant located in the Biobío Region, in order to determine its potential uses in Civil Engineering.

**KEYWORDS:** Thermoelectric, slag.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ccea@ing.ucsc.cl](mailto:ccea@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jmontenegro@ucsc.cl](mailto:jmontenegro@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Rudnick (2006) proyectaba que para suplir las necesidades eléctricas derivadas del crecimiento económico, en la actual década, Chile debía duplicar la capacidad de generación instalada, es por ello que las industrias energéticas han incrementado su producción considerablemente, y en el caso de las centrales termoeléctricas que utilizan el carbón como combustible, se ha incrementado grandemente la producción de residuos (cenizas volantes y escorias) las cuales provienen de este tipo de industrias, según Ruiz & Polanco (1995). Grandes volúmenes de estos materiales deben ser almacenados y tratados convenientemente teniendo en cuenta las exigencias ambientales que varían en cada país. Por lo tanto, es de letal importancia el aprovechamiento de estos residuos en la Ingeniería Civil, entregando opciones funcionales a los problemas derivados.

Las centrales termoeléctricas de carbón generan energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor por medio de la quema de carbón. En el proceso se generan residuos sólidos, los cuales pueden ser cenizas volantes y escorias. Ésta última se produce cuando las cenizas se funden y se aglomeran entre sí en partículas más grandes.

La combustión de 1 tonelada de carbón genera un promedio de 80 a 250 kg de residuos dependiendo del tipo de carbón utilizado. Estos residuos están compuestos por aproximadamente 70% de material sílico-aluminoso (Robayo, et. al. 2016). En la central termoeléctrica dónde se obtuvieron las muestras de escorias analizadas en este estudio, se generan en total aproximadamente 380 toneladas de residuos al día en el proceso de combustión del carbón y un 10% de esto pertenece a escorias (38 ton/día). Como la mayoría de los subproductos provenientes del sector industrial, los desechos de ésta cantidad de residuos forman parte de una gran problemática, y puede convertirse en un contaminante ambiental si no se le da un uso y almacenamiento adecuado.

Es por ello que actualmente hay una creciente demanda en la utilización de los residuos de combustión de carbón en el área ingenieril, como materia prima para la producción de materiales de construcción, tales como; mezclas de concreto y mortero, cementos, áridos ligeros, bloques y ladrillos, entre otras aplicaciones (Robayo, et. al. 2016). León & Ramírez (2010) afirman que esto es debido a que los agregados reciclados pueden tener características y propiedades competentes, pese a que en ocasiones las resistencias obtenidas sean inferiores a los agregados naturales.

La escoria de carbón posee propiedades y características muy llamativas para una provechosa reutilización, como lo es una granulometría abierta, lo que en concretos autocompactantes, Medina, et al. (2010), afirman que si las partículas de escoria son molidas finamente, se puede producir una reducción del volumen de espacios vacíos, disminuir así la fricción entre sus componentes y por ende, su resistencia al flujo en estado fresco.

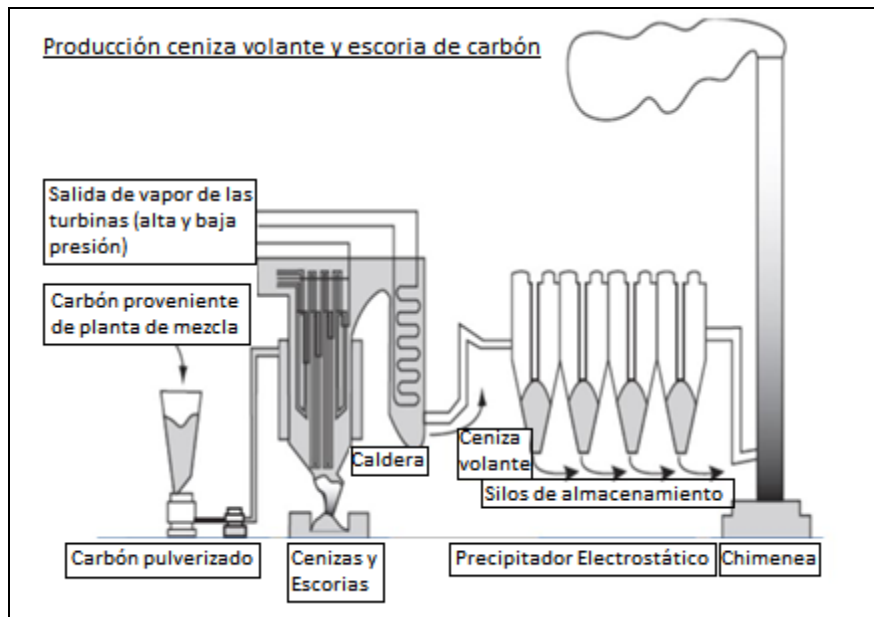
Así mismo, para la construcción de muros de contención grandes volúmenes de geomateriales son excavados para utilizarlos como relleno. Los costos generados para la construcción van ligados a las características físicas y mecánicas de los materiales empleados. Una posible alternativa consistiría en el uso de escoria de carbón, como relleno en muros de contención y terraplenes; generaría menores costos en lo que respecta a la adquisición del material (Duque, 2014).

Como parte de un proyecto de investigación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, sobre el uso de la ceniza volante y la escoria de carbón, de una central termoeléctrica de la Región del Biobío, el enfoque principal de este estudio es la caracterización geotécnica de las escorias de carbón procedente de esta central. Se busca encontrar el potencial de las escorias para uso a nivel ingenieril, mediante ensayos de laboratorio, para así aprovechar este subproducto en diferentes áreas y dar soluciones a problemas de almacenamiento de la misma central termoeléctrica.

## 2. MARCO TEÓRICO

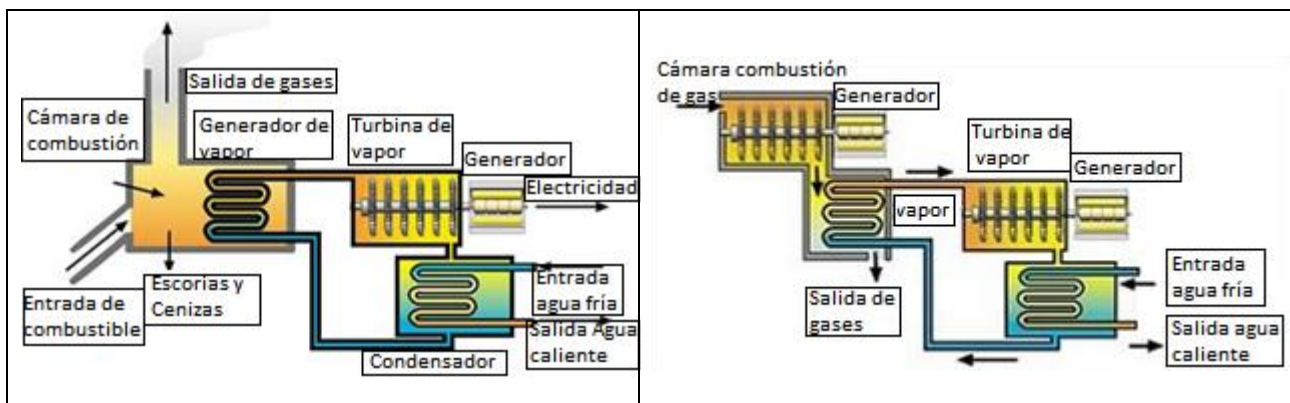
### 2.1 Generalidades

Las centrales termoeléctricas tradicionales a carbón, poseen una caldera donde se produce la combustión, se genera vapor el cual se expande dentro de una turbina que impulsa un alternador, lo que transformará la energía interna en energía mecánica, generando la electricidad, por medio de un eje de rotación, para luego pasar por un transformador que aumentará su tensión para el transporte (Figura 1). Finalmente el vapor será enfriado en un condensador, para transformarlo en líquido y retornarlo a la caldera para comenzar nuevamente el ciclo de producción de vapor (Figura 1).



**Figura 1.** Producción ceniza volante y escoria de carbón en una termoeléctrica tradicional. (Modificado de Sear, 2001)

Existen dos tipos de centrales termoeléctricas; las centrales termoeléctricas de ciclo convencional y las de ciclo combinado (Figura 2). Las centrales de ciclo convencional son aquellas que obtienen la energía mecánica necesaria para mover el rotor del generador a partir del vapor generado por la caldera (Figura 2a). Las centrales termoeléctricas de ciclo combinado son aquellas donde se genera electricidad mediante la utilización conjunta de una turbina a gas y otra a vapor (Figura 2b).



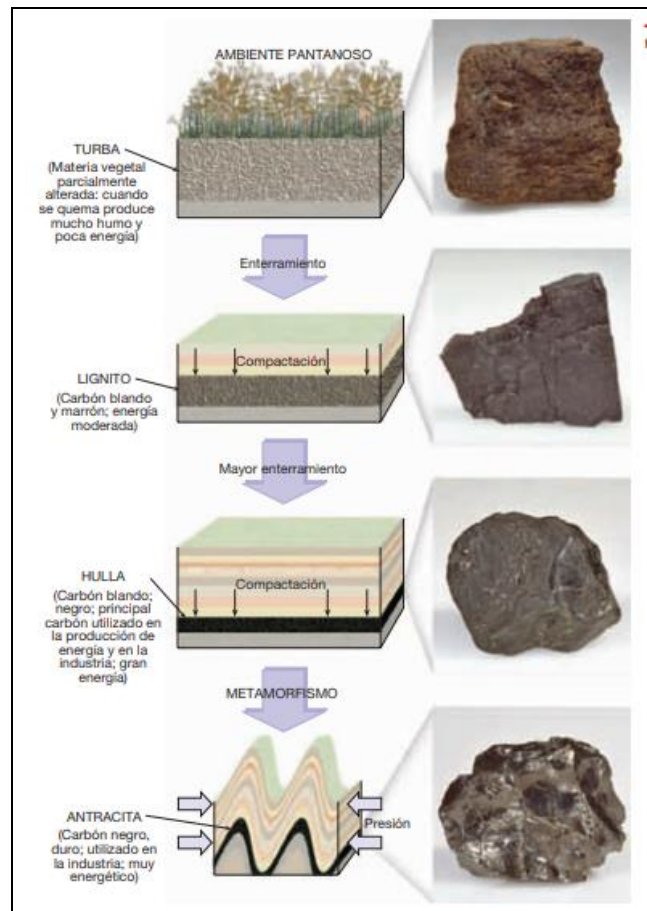
**Figura 2a.** Funcionamiento ciclo convencional

**Figura 2b.** Funcionamiento ciclo combinado.

**Figura 2.** Tipos de centrales termoeléctricas (Modificado de Machado, 2010).

## 2.2 Combustión de carbón y generación escoria de carbón

El carbón es muy diferente de las otras rocas sedimentarias. A diferencia de la caliza y de las rocas silíceas, que son ricas en sílice y en calcita, el carbón está compuesto de materia orgánica (Tarbuck et. al. 2005). El carbón se forma de la descomposición lenta de grandes cantidades de materia vegetal. Las masas vegetales anegadas y sepultadas como consecuencia de diversos movimientos geológicos se fueron consolidando entre otros estratos de roca y transformándose progresivamente en turbas, lignitos, hullas y antracitas (Figura 3), por la acción conjunta de la presión, temperatura y reacciones químicas y/o bacteriológicas a lo largo del tiempo de millones de años.



**Figura 3.** Etapas sucesivas en la formación del carbón (Tarbuck et. al. 2005)

Los carbonos, están compuesto principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno (Goñi, 2009). Contienen además una fracción no combustible constituida por minerales como cuarzo, arcillas, óxidos de hierro, sulfatos o carbonatos, procedentes de los estratos de roca que quedaron englobados con el carbón durante su consolidación (Goñi, 2009). Se utiliza como fuente de energía, para la generación de energía eléctrica y la producción de acero y gas.

En Chile, según datos del Ministerio de Energía, en el año 2013 entre el SIC (Sistema Interconectado Central) y el SING (Sistema Interconectado Central Norte Grande), se consumieron poco más de 12 millones de toneladas de carbón. Actualmente en la Región del Biobío hay 56 proyectos energéticos, instalados en 42 de sus 54 comunas, los que pueden aportar 4.753 MW al Sistema Interconectado Central. Del total de la capacidad instalada, el 18% proviene de las centrales térmicas a carbón.

En la generación de energía en centrales térmicas (Figura 1, 2), se utiliza el carbón en fragmentos de hasta 5 cm, los cuales se introducen en las calderas y se queman a altas temperaturas de hasta 1500°C. El carbón es triturado, pulverizado e introducido dentro de una cámara de combustión donde los componentes orgánicos son oxidados y volatizados, y los minerales inorgánicos (como el cuarzo, calcita, yeso, pirita, feldespatos y minerales de la arcilla) se funden en el horno y se fusionan (Sanjuan et al., 2015).

El proceso de combustión de carbón origina fundamentalmente dos tipos de subproductos; cenizas volantes y escoria, cuya principal diferencia es el tamaño de las partículas. Las partículas más finas corresponden a las cenizas volantes, las cuales se obtienen por precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión comprendido en los gases procedentes de la combustión. Mientras que la escoria cae al fondo por gravedad (Figura 4), para luego ser recogidas y llevadas finalmente a centros de acopio (Figura 5).



**Figura 4.** Escoria de carbón.



**Figura 5.** Cancha de acopio residuos termoeléctrica.

Una característica de la escoria de carbón, es que es un material con gran cantidad de poros (Figura 6), lo que ofrece una gran permeabilidad, siendo un material adecuado para la construcción de capas granulares de subbase o drenantes. La principal desventaja de este material es su baja resistencia a la fragmentación, es por ello que se imponen materiales adicionales para mejorar su resistencia.

Las escorias del carbón utilizado en las centrales térmicas no deben confundirse con las escorias de mina de carbón, escorias siderúrgicas o las de alto horno, ya que sus características y aplicaciones no son las mismas.



**Figura 6.** Textura porosa de escoria de carbón estudiada.

### 2.3 Usos de escoria de Carbón

La producción de productos de combustión de carbón crece de manera paralela al consumo de carbón. En 1992 la producción mundial de estos materiales fue de 459.000 millones de toneladas, con una tasa de reciclaje del 33%. En 2007 la cifra de producción fue de 750.000 toneladas, más del 60% de las cuales habrán sido depositadas en vertederos, mientras el 40% restante se habrá reciclado, sobre todo en la construcción, como materias primas o de adición para fabricar cementos y hormigones, en usos geotécnicos como materiales para rellenos o como estabilizadores de suelos (Manz, 1997).

En los países más desarrollados, donde la problemática medioambiental de la acumulación de los residuos ha comenzado a ser abordada, se están promoviendo diversas iniciativas para reducir la producción de subproductos de la combustión del carbón y promocionar su reutilización en áreas de la ingeniería.

Las cenizas volantes y las escorias procedentes de centrales térmicas de carbón, son materias primas idóneas para diversos usos, dependiendo de su composición química, granulometría o contenido en inquemados.

La escoria es un material vítreo, que debido a su rápido enfriamiento posee una naturaleza vesicular y porosa, similar a la arena (Figura 7). Debido a las propiedades físicas y su granulometría, la escoria tiene usos más limitados que las cenizas volantes, sin embargo, diferentes estudios han considerado la utilización de escoria como sustitutos de los agregados pétreos en capas granulares, también usos en la fabricación de cemento, o bien como rellenos industriales en hormigones y mejoramiento de carreteras (Parra & Sánchez, 2010).



**Figura 7.** Escoria de carbón estudiada.

- Áridos ligeros sintéticos

Se denomina áridos a los materiales granulares que se añaden como fase dispersa para obtener morteros y hormigón, constituidos, por lo general, por rocas machacadas (Luaces, 2010). Los áridos ligeros son áridos de baja densidad, de materiales porosos de origen natural o fabricados artificialmente. La porosidad es la característica básica a la que deben los áridos ligeros sus propiedades de baja densidad, resistencia a la helada y alto poder aislante térmico y acústico (Goñi, 2009).

Estudios de Ruiz & Polanco (1995), Manz (1997) y Robayo et. al. (2014) demostraron el uso de subproductos derivados de la combustión de carbón, en procesos para sintetizar áridos a partir de materias primas en polvo como las cenizas volantes y/o escorias trituradas hasta un tamaño de partículas adecuado.

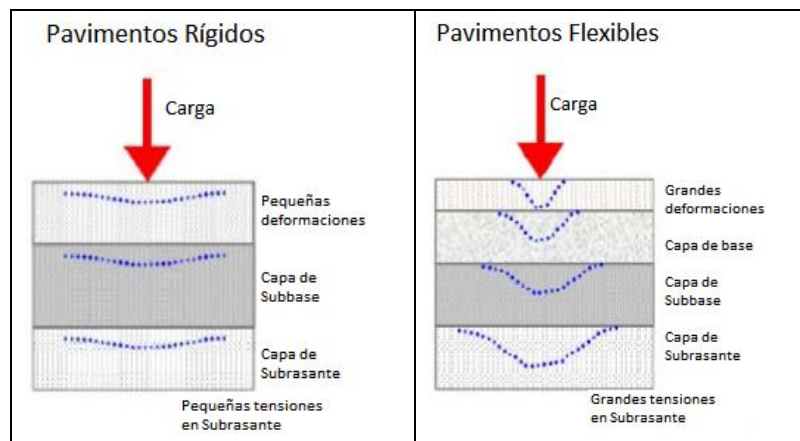
El material en polvo es conformado como partículas esféricas de tamaños variados. El proceso de aglomeración puede llevarse a cabo por granulación en plato giratorio, por extrusión o por prensado, utilizando una cantidad precisa de agua como ligante (Baykal & Döven, 2000). A veces se añaden aditivos para dotar de plasticidad a la mezcla y otros materiales que intervienen como activadores en la posterior etapa de consolidación o endurecimiento de las partículas aglomeradas (Baykal & Döven, 2000). Una vez conformadas las partículas son tratadas para que adquieran la dureza y la resistencia mecánica necesarias (Baykal & Döven, 2000).

Los áridos ligeros porosos se aplican también en geotecnia, como material de relleno para taludes (Goñi, 2009).

- Mejoramiento de carreteras

El suelo se deforma bajo la acción de las cargas directas y transmitidas, es por ello que la resistencia debe tener valores que no descieran en ninguna circunstancia de los que exigen las cargas que ha de soportar (Marquina, 2008).

Los pavimentos se pueden clasificar en rígidos (Figura 8a) y flexibles (Figura 8b). El comportamiento de los mismos al aplicarles cargas es muy diferente (Figura 8). En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante. Lo contrario sucede en un pavimento flexible, la superficie de rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante (Miranda, 2010).


**Figura 8a.** Pavimentos rígidos

**Figura 8b.** Pavimentos flexibles

**Figura 8.** Clasificación de pavimentos (Modificado de Miranda, 2010).

En Chile, los ensayos que deben realizarse para establecer los parámetros de caracterización de suelos, están referenciados en base a la normativa nacional o extranjera aplicable, la que determine la autoridad respectiva o la que se especifique para el proyecto particular y cuyas metodologías de medición y ensayo deben ser realizadas por un Laboratorio de Control Técnico de Calidad de Construcción del Minvu, según Decreto Supremo N° 10 año 2002 (Código de normas y pavimentación, 2018). Entre las normas vigentes se encuentra ASTM C989 y ASTM C618.

Según estudios de Ruiz & Polanco (1995), Goñi (2009), Duque et. al. (2014), Robayo et. al. (2014), entre otros, sobre las propiedades de los suelos, han desarrollado alternativas de gran interés para lograr su estabilización con materiales reciclados, reduciendo así el costo de la construcción y mejoramientos de caminos, formando carreteras capaces de soportar las cargas transmitidas por alto tráfico, y además, reduciendo el impacto ambiental con la reutilización de subproductos industriales.

Para estabilizar un suelo grueso o fino debemos tener en cuenta la distribución en tamaño de sus partículas, forma, textura, peso volumétrico, fricción interna y cohesión. Marquina, M. (2008) establece que los suelos utilizables para la construcción de carreteras comúnmente son:

- Suelos que proceden de bancos naturales: depósitos de arena del mar como arenas uniformes, o depósitos de ríos como gravas, arenas, limos y arcillas.
- Suelos procesados: suelos que requieren ser procesados para mejorar su granulometría, proporcionar una alta densidad, buena distribución de tamaño de partículas, para poder así conseguir buenas compacidades y mejor consistencia.
- Suelos que proceden de bancos de préstamos: suelos utilizables y adecuados para construcción de carreteras, se extraen de excavaciones cercanas de la obra vial.
- Suelos del tipo especial: Son suelos que han sido modificados en sus propiedades físicas, químicas para obtener resultados adecuados y utilizables para carreteras, por ejemplo las escorias.

Pérez & Collantes (2012) afirman que una concentración de 25% de escorias finamente molidas en un suelo arcilloso puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras.

- Concretos Autocompactantes (CAC)

La alta demanda de agregados naturales para la producción de mezclas de concreto, como resultado del continuo desarrollo de la industria de la construcción, ha planteado la valoración de subproductos industriales para la producción de gravas y arenas recicladas, las cuales sean aptas para uso como agregados en la elaboración de mezclas de concreto autocompactante (Robayo, et. al. 2014).

El concreto autocompactante es un tipo de concreto que se compacta por su peso sin necesidad de vibración debido a su alta fluidez y cohesión, lo cual le permite instalarse incluso en zonas de difícil acceso, logrando buena consolidación sin que se produzca exudación ni segregación (Okamura, 1997). Los concretos autocompactantes presentan diseños de mezcla especiales donde se manejan agregados específicamente gradados y aditivos como reductores de agua de alto rango para aumentar la fluidez y modificadores de viscosidad que controlan la segregación y la exudación de la mezcla (Okamura, 1997).

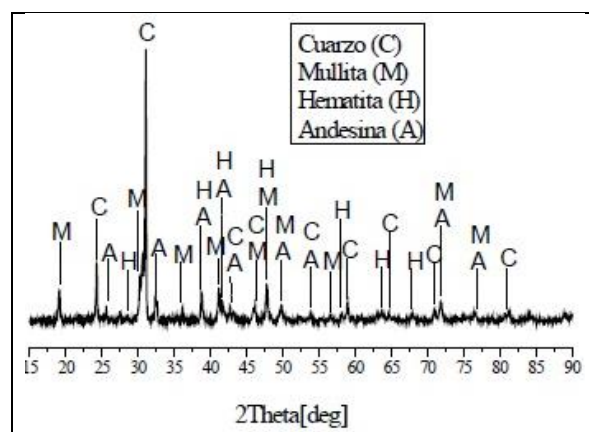
El estudio de Robayo, et. al. (2016) utilizó un cemento Portland tipo I de uso general, el cual está compuesto principalmente por los elementos que se observan en la Tabla 1, el cual presenta una adición de material calcáreo ( $\text{CaCO}_3$ ).

**Tabla 1:** Composición química del cemento. Modificado (Robayo, A. et. al., 2014)

Componente	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	PI
% en peso	20,20	4,52	4,45	61,54	1,58	0,16	0,27	2,48	4,8

Robayo, et. al. (2016) utilizó escoria obtenida como sub-producto de la combustión de carbón en la región Valle del Cauca, Colombia. La escoria de carbón fue molturada hasta obtener un tamaño de partícula similar a la del cemento. El tamaño de partícula obtenido fue de 19,1  $\mu\text{m}$ , similar a la del cemento la cual fue de 22,7  $\mu\text{m}$ .

La composición química de la escoria de carbón fue obtenida por la técnica de espectrofotometría de fluorescencia de rayos X (Figura 9). El difractograma de rayos X obtenido, se puede observar que la escoria de carbón no es totalmente amorfa y presenta fases cristalinas como cuarzo, mullita, hematita y andesina. El difractograma evidencia un pico de mayor intensidad el cual indica que la escoria tiene una gran cantidad de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). Además, se observan varios picos característicos de la mullita (silicato de aluminio) y hematita con baja intensidad, lo cual indica que estas fases se encuentran en una menor proporción (Robayo et. al. 2016).



**Figura 9.** Difractograma de escoria de carbón estudiada por Robayo et. al. 2016.

Según composición química (Tabla 2), se puede observar que esta escoria está compuesta esencialmente de un 78% de material silico-aluminoso, que en efecto la hace potencialmente útil como puzolana en sustitución parcial del cemento Portland en mezclas de concreto (Robayo, et. al. 2016).

**Tabla 2:** Composición química de escoria de carbón según estudio Robayo et. al. 2016.

Componente	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	S	$\text{P}_2\text{O}_3$	Ba
% en peso	20,99	27,45	6,53	4,92	1,53	1,30	1,11	0,74	0,21	0,17	0,10

Los resultados de los estudios de Robayo et. al. (2016) están acordes con los resultados obtenidos por Guneyisi et. al. (2009), Wang et al. (2013) y Boukendakdji et al, (2012), dónde se pudo observar que la adición de escoria de carbón en la mezcla de CAC no produjo incrementos en la demanda de agua y en la cantidad de aditivo superplastificante requerido para lograr las propiedades de diseño en estado fresco y cumplir con los criterios de conformidad según la Efnarc (2005).

Algunos autores como Boukendakdji et al. (2001) y Guneyisi et al. (2009), afirman que la morfología de las partículas de la adición cuando presentan baja relación de aspecto, distribución granulométrica similar a la del cemento, baja porosidad y textura superficial lisa, son factores que logran mejorar el desempeño en estado fresco de las mezclas de CAC, debido a la reducción de volumen de espacios vacíos, la fricción entre sus componentes y su resistencia al flujo.

En este sentido entonces, es de interés considerar los efectos de la adición de escoria de carbón finamente molida en la obtención de un concreto autocompactante, basándose en la evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido de las mezclas elaboradas. De esta manera, la obtención de un concreto con características autocompactantes usando la escoria de carbón como reemplazo del cemento, brindaría a la industria de la construcción un material alternativo, económicamente viable y de alto desempeño en estado fresco y endurecido, útil para ser usado en el conformado de estructuras complejas y densamente armadas (Robayo et. al. 2016).

### 3. METODOLOGÍA

El material de estudio fue recolectado (100 kg) de los residuos producidos por la combustión de carbón de una termoeléctrica local en la Región del Biobío. En el laboratorio se procedió al cuarteo y homogenización de la muestra obtenida, y la selección de muestras representativas sobre las que se ejecutaron ensayos de caracterización, compactación y compresión no confinada, preparando el material según norma ASTM 421 (Tabla 3).

**Tabla 3:** Metodología utilizada e ensayos geotécnicos y sus respectivas normas.

	<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
Caracterización del material	Granulometría	ASTM D 422
	Límites de Atterberg	ASTM D 4318
	Densidad de partículas sólidas	ASTM D 5550
Compactación	Proctor	ASTM D 1557
	Densidad máxima y mínima	ASTM D 4253 y ASTM D 4254
	CBR	ASTM D 1883
Propiedades resistentes	Corte Directo	ASTM D 3080

#### 3.1 Ensayos Geotécnicos de Caracterización

- Granulometría por tamizado

El objetivo del siguiente ensayo es determinar la distribución de las partículas de un material de acuerdo a su tamaño. Ésta se determina mediante el tamizado por mallas de distinto diámetro hasta el tamiz N° 200 (diámetro de 0.074 mm).

El ensayo granulométrico se ha efectuado siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 422. Se tomaron 500 g de material secado en horno a 110 °C por 24 horas, el cual pasó la malla N° 4 (4,75 mm) y se procede a ser lavado por la malla #200. El material que queda retenido en la malla se seca en horno nuevamente y se pasa por los tamices: N° 10 (2,00 mm), N° 40 (0,425 mm), N° 200 (0,075 mm) mediante vibración

El análisis granulométrico deriva en una curva granulométrica, donde de forma gráfica obtenemos el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiza vs. el diámetro de tamiz.

- Determinación del límite líquido y límite plástico

La plasticidad se determina mediante los límites líquidos y plásticos, siguiendo la norma ASTM D 4318. El límite líquido se determina mediante la cuchara de Casagrande y el límite plástico a través del método de los bastones.

- Densidad de partículas sólidas

La gravedad específica (Gs) se ha efectuado siguiendo la metodología de las normas ASTM D 5550 y NCh 1516 Of. 79. Se tamiza la muestra por la malla N° 4 (4,75 mm) y se seca en el horno (110°C) durante 24 horas. Se introduce una muestra seca de aproximadamente 100 gramos a un picnómetro limpio y seco. Se agrega agua destilada al picnómetro hasta que toda la muestra quede sumergida y se conecta a una bomba de vacío durante 15 minutos (según NCh 1516), con la finalidad de quitar todo el aire atrapado. Posteriormente, se agrega agua hasta la marca de calibración del picnómetro y se compara la masa final con la masa del picnómetro + agua hasta la marca de calibración.

Se calcula la densidad de partículas sólidas según la ecuación 1:

$$Gs = \frac{ms}{(ms + Ma) - Mm} * \rho w_{tx} \quad (Ec. 1)$$

Dónde: - Gs: densidad de partículas sólidas, g/cm<sup>3</sup>

- ms: masa seca de la muestra de ensayo, g
- Ma: Masa del picnómetro más el agua a la temperatura de ensayo, g
- Mm: Masa del picnómetro más la muestra y el agua a la temperatura de ensayo, g

### 3.2 Ensayos Geotécnicos de Compactación

- Relación humedad-densidad

Debido a la granulometría de la muestra se ejecutó el ensayo Proctor Modificado, mediante el método D, según norma ASTM D 1557 y NCh 1534/II Of. 79.

En el ensayo Proctor modificado, cada punto ensayado contiene una humedad propia, a la cual se le asocia un valor único de densidad seca. A través de un ajuste parabólico, en la función generada por los puntos de densidad seca y humedad, podemos encontrar en el valor máximo de la curva la densidad máxima compactada seca (DMCS) y su respectiva humedad asociada denominada humedad óptima.

- Determinación de las densidades máxima y mínima

La finalidad de este ensayo es determinar las densidades secas máxima y mínima de materiales no cohesivos y no cementados. Además de tamaño máximo nominal de 80 mm, que contenga hasta un 12% en masa de partículas menores que 0,08 mm. También debe tener un índice de plasticidad igual o menos que 5.

- Capacidad de soporte

La capacidad de soporte del material (CBR) ha sido determinada mediante la norma ASTM D 1883 y NCh 1852. Se procede a colocar el material en tres probetas con distintos niveles de compactación, es decir 10, 25 y 56 golpes por capa, con un total de cinco capas, con sus respectivas humedades óptimas determinadas en el ensayo Proctor modificado.

Las probetas son completamente sumergidas en un estanque con agua a temperatura ambiente durante 96 horas, y con ayuda de un deformímetro se va midiendo el cambio volumétrico (hinchamiento) que presenta. Esto es para simular el caso más desfavorable al cual puede ser sometido el suelo en condiciones naturales.

Transcurrido este proceso, se procede a la penetración de las probetas en una prensa. Se ajusta una velocidad controlada de avance de 1,25 mm/min, la cual aplica la fuerza sobre la probeta a través de un pistón de área circular.

Posterior a la inmersión se toman las medidas finales de la expansión y se calcula el porcentaje de expansión según la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{\text{expansión (mm)}}{116,4} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

### 3.3 Ensayos Geotécnicos de Propiedades Resistentes

- Corte Directo

En estudios de mecánica de suelos es de letal importancia para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de la masa de un suelo conocer la resistencia al corte de un material. Una muestra de un suelo a un esfuerzo de corte tiende a producir un desplazamiento de las partículas entre sí.

El ensayo de corte directo impone sobre un suelo las condiciones idealizadas. Es decir, induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado. Sobre este plano actúan dos esfuerzos; un esfuerzo normal (Ec. 2) debido a una carga vertical  $P_v$  aplicada externamente y un esfuerzo cortante (Ec. 3) debido a la aplicación de una carga horizontal  $P_h$ .

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\tau = \frac{P_h}{A} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $A$  es el área nominal de la muestra (o de la caja de corte) y usualmente no se corrige para tener en cuenta el cambio de área causada por el desplazamiento lateral de la muestra  $P_h$ . Estos esfuerzos deberían satisfacer la ecuación 4 de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan\phi \quad (\text{Ec. 5})$$

En la Ec. (4) existen dos cantidades desconocidas, cohesión y ángulo de fricción ( $c$  y  $\phi$  respectivamente), las cuales se pueden obtener gráficamente.

Para materiales no cohesivos, la cohesión debería ser cero por definición.

$$\tau = \sigma_n * \tan\phi \quad (\text{Ec. 6})$$

## 4. RESULTADOS

En la Tabla 4 se presentan las características físicas de la escoria de carbón.

**Tabla 4:** Resumen características físicas escoria de carbón.

<b>Estado físico</b>	Sólido.
<b>Color</b>	Negro, marrón y gris.
<b>Textura</b>	Áspera, vesicular, angulosa.
<b>Olor</b>	Sí.
<b>Tamaño (cm)</b>	Hasta 5 cm.
<b>Génesis</b>	Combustión de carbón en termoeléctrica.
<b>Solubilidad en agua</b>	Desprende partículas finas, tornando el agua de color gris.

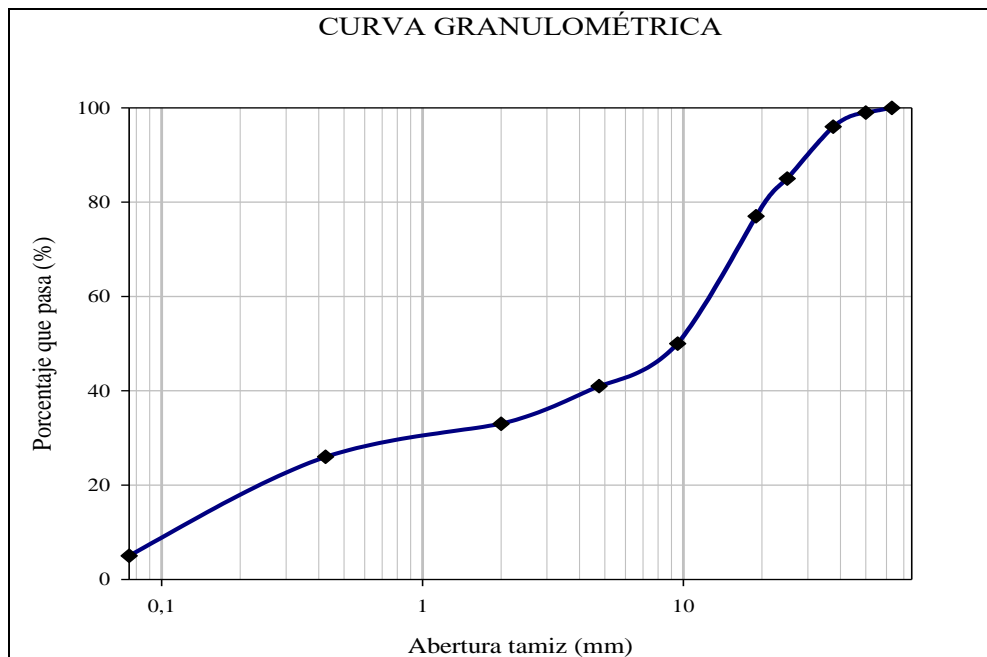
#### 4.1 Ensayos Geotécnicos de Caracterización

- Granulometría por tamizado

En la Tabla 5 se presentan los detalles del ensayo. La distribución de los tamaños de partícula de la escoria de carbón se puede observar en la Figura 10 a través de la curva granulométrica obtenida.

**Tabla 5:** Resumen datos ensayo granulométrico  
Escoria de carbón.

N° Tamiz	Tamiz (mm)	% Que pasa
2 ½''	63	100
2''	50	99
1 ½''	37,5	96
1''	25	85
¾''	19	77
3/8''	9,5	50
N° 4	4,75	41
N° 10	2	33
N° 40	0,425	26
N°200	0,075	5



**Figura 10.** Curva Granulométrica Escoria de Carbón.

La curva granulométrica (Figura 10) de escoria de carbón estudiada demuestra que más del 50% del material ensayado es mayor en tamaño que el tamiz n°200, y sólo posee un 5% de finos. Lo cual según el sistema unificado de clasificación de los suelos, se trata de un material GP-GM, es decir, una grava pobremente graduada.

Según sistema de clasificación AASTHO (Tabla 6), se trata como un material A-1-a, es decir, cantos, gravas y arenas, lo cual califica la muestra como un material excelente a bueno para bases y subbases, según características de materiales granulados.

**Tabla 6:** Características de los materiales granulados para Bases y SubBases según Clasificación AASHTO.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 <sup>A</sup>	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

- Determinación del límite líquido y límite plástico

Este ensayo se realizó con material tamizado por la malla N° 40 (0,425 mm), sin embargo, debido a la consistencia del material, no se pudo determinar el porcentaje de límite líquido y plástico, por lo tanto no presenta límite de plasticidad, según ASTM D4318.

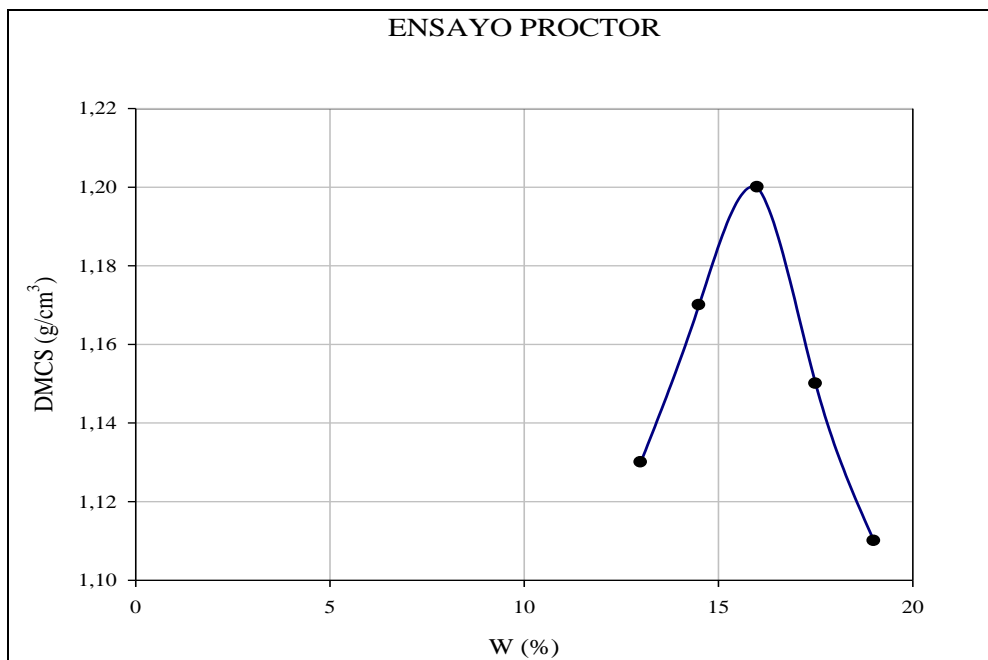
- Densidad de partículas sólidas

Se realizaron 3 ensayos para obtener el valor de la densidad de partículas sólidas. El resultado de los ensayos da un promedio de 1,96 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2 Ensayos Geotécnicos de Compactación

- Relación humedad-densidad

En la Figura 11, se muestra la curva obtenida con los valores de densidad óptima y humedad máxima de compactación correspondiente a la escoria de carbón. Utilizando el método de Proctor Modificado, método D, debido a la granulometría de la muestra.



**Figura 11:** Curva compactación ensayo Proctor Modificado.

De la Figura 11 podemos obtener el punto máximo o peak el cual corresponde a la densidad máxima seca del suelo compactado (DMCS) de 1,2 g/cm<sup>3</sup> y su proyección en la abscisa correspondiente a la humedad óptima (W%) es de 16%.

- Determinación de las densidades máxima y mínima

La determinación de la densidad máxima promedio según ASTM D4253-16 y la densidad mínima promedio según ASTM D 4254-16, está dada en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Resumen datos ensayo densidad máxima y mínima escoria de carbón.

Densidad máxima promedio (g/cm <sup>3</sup> )	1,161
Densidad mínima promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0,805

- Capacidad de soporte

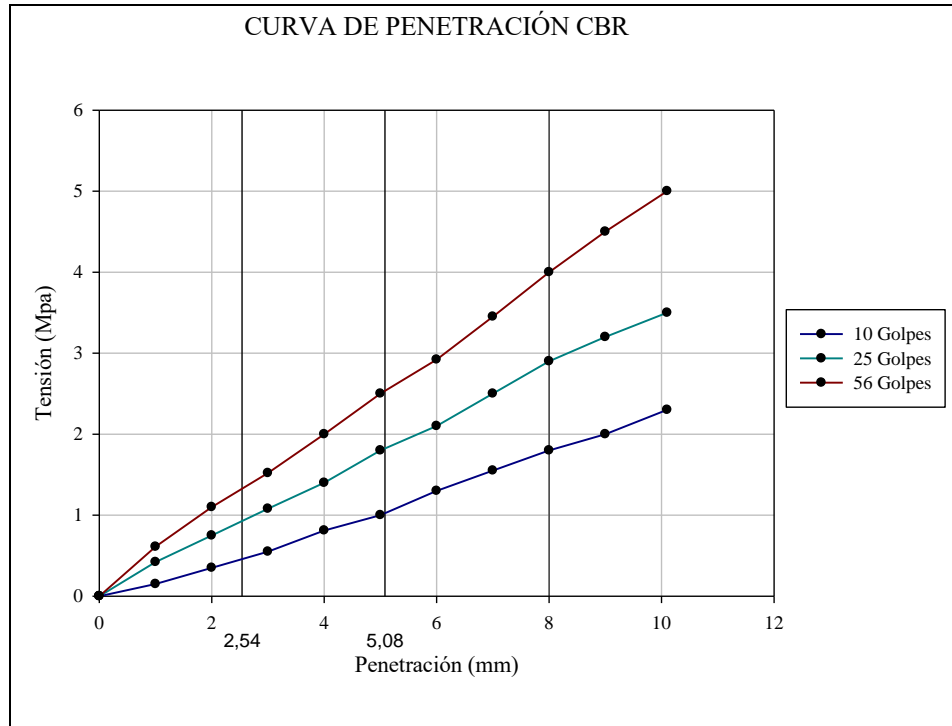
Los datos obtenidos en ensayo de la capacidad de soporte (CBR) del material escoria de carbón, está resumido por la Tabla 8. Cabe destacar que el método que se empleó para preparar y compactar la probeta es el método D.

**Tabla 8:** Resumen datos ensayo CBR.

Número de golpes	10	25	56
Densidad seca muestra antes de inmersión (kg/L)	1,11	1,16	1,19
Densidad seca muestra después de inmersión (kg/L)	1,10	1,15	1,18
Humedad muestra antes de compactación (%)	16,1	16,1	16,2
Humedad muestra después de compactación (%)	16,0	16,0	16,1
Capa superior de 25 mm después de inmersión (%)	17,1	17,0	16,9

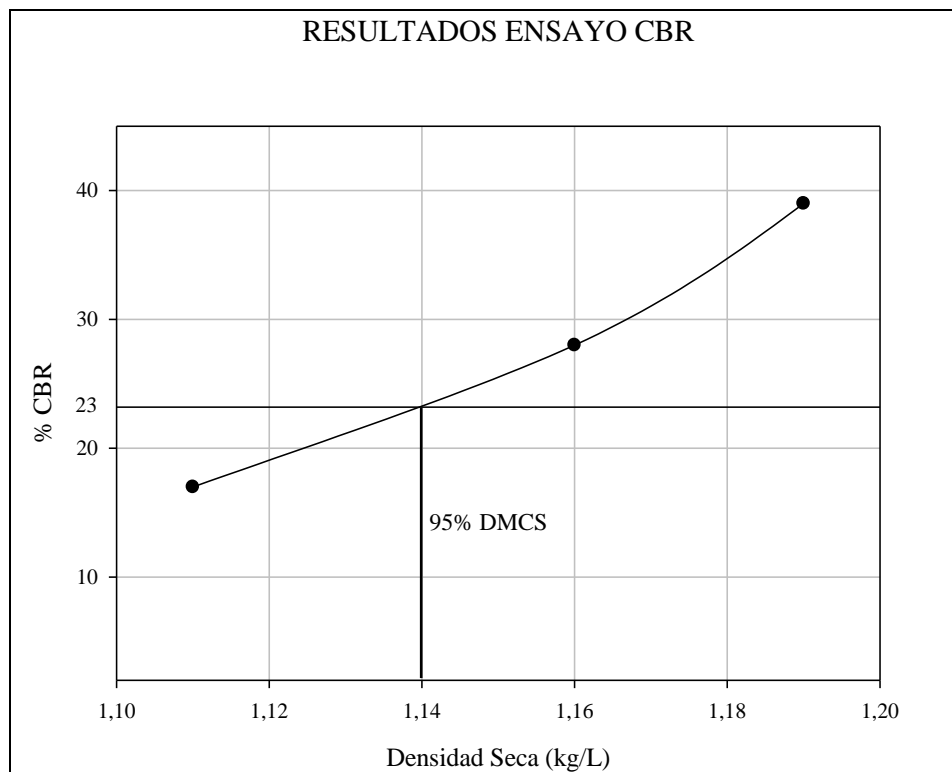
Altura total después de inmersión (%)	16,6	16,4	16,5
Expansión altura inicial (%)	1,2	0,8	0,2
Sobrecarga (kg)	5,014	4,978	5,054

El ensayo CBR realizado a la humedad óptima obtenida del ensayo Proctor Modificado y a diferentes niveles de compactación indica la capacidad de soporte de las escorias ensayadas. En la Figura 12 se presenta la gráfica tensión-penetración. La razón de soporte para la carga máxima es de 17%, 28% y 39%, para 10, 25 y 56 golpes respectivamente.



**Figura 12:** Curvas de penetración ensayo CBR.

En la Figura 13 se observa que al 95% de la densidad máxima de compactación seca (DMCS) determinada según ensayo Proctor Modificado, se obtiene la razón de soporte de la muestra 23% para 5mm de penetración, lo cual afirma que se trata de una muestra granular.



**Figura 13:** Resultados ensayo CBR.

### 4.3 Ensayos Geotécnicos de Propiedades Resistentes

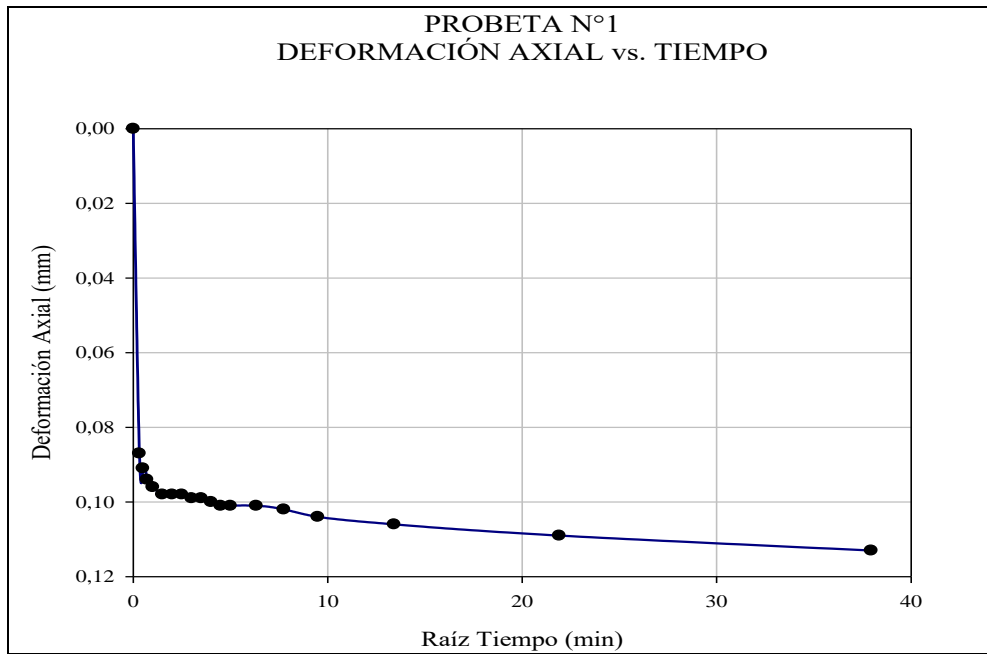
- Corte Directo

El ensayo de corte directo se realizó según norma ASTM D3080. Para una probeta remoldeada de 10cm x 10cm. A continuación se presenta en la Tabla 9 los datos para cada probeta y las gráficas correspondientes.

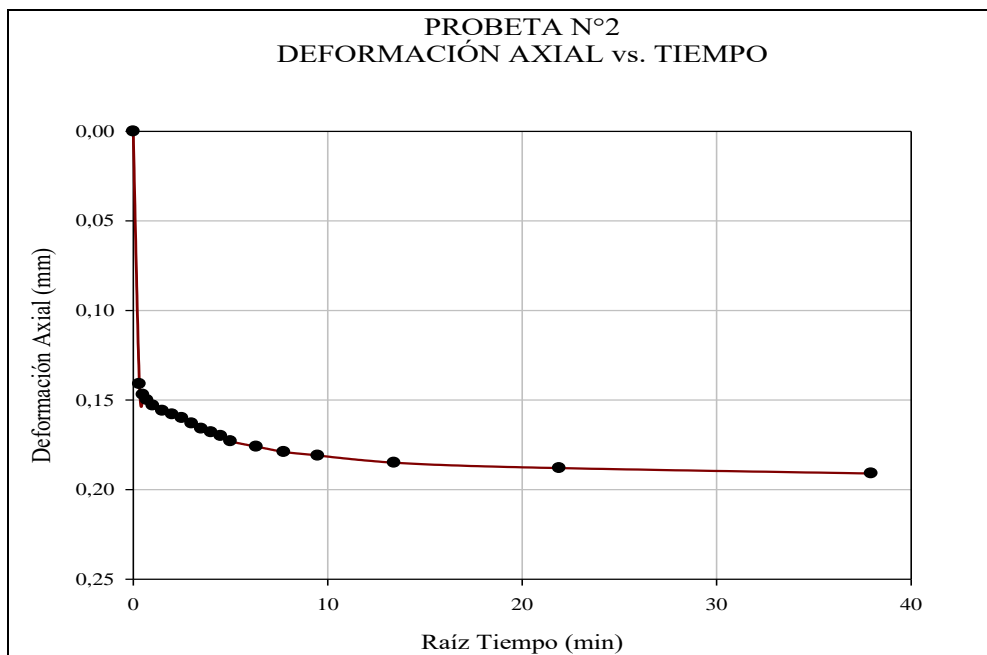
**Tabla 9:** Resumen datos ensayo Corte directo.

Datos de Probeta	1	2	3
Fuerza Normal N (kg)	25	50	100
Tensión Normal (kg/cm <sup>2</sup> )	0,25	0,50	1,00
Masa seca (Ms) (g)	586,4	588,4	589,5
Contenido de agua inicial (g)	65,8	65,1	64,7
Humedad inicial (%)	14,5	14,3	14,2
Humedad final (%)	14,1	14,2	14,4
Densidad húmeda inicial (g/cm <sup>3</sup> )	0,927	0,928	0,927
Densidad seca inicial (g/cm <sup>3</sup> )	0,809	0,812	0,812
Grado de Saturación (%)	20,0	19,9	19,7
Relación de vacíos (%)	1,42	1,41	1,41

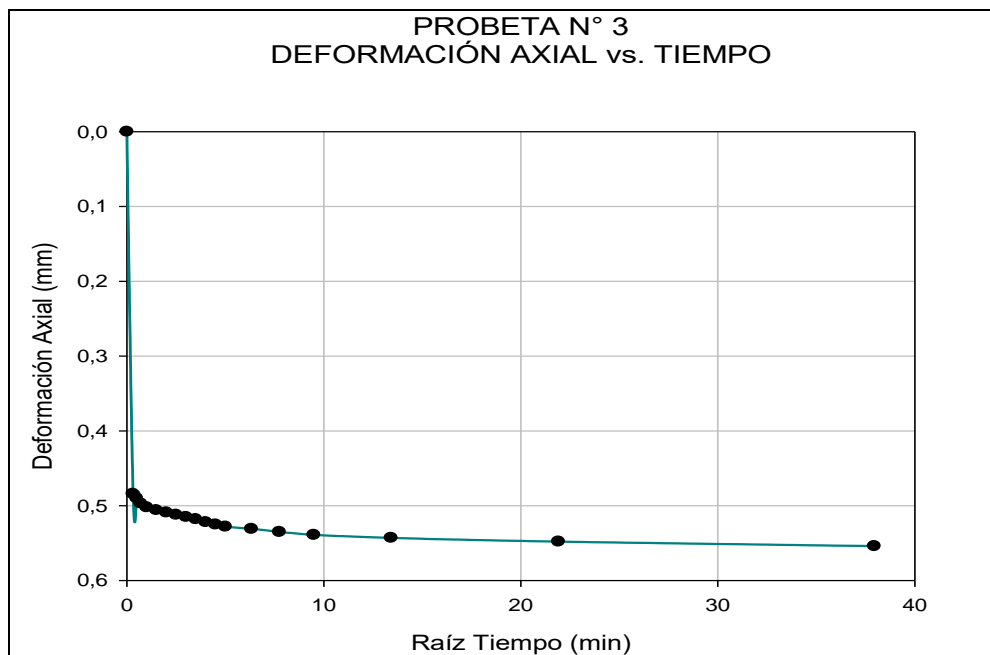
Se grafican las curvas deformación axial vs. el tiempo para cada probeta ensayada (Figura 14, 14 y 16), con fuerza normal de 25,50 y 100 kPa respectivamente. La velocidad de corte es de 0,958 mm/min.



**Figura 14:** Curva Deformación Axial vs Tiempo, ensayo Corte directo probeta n°1.

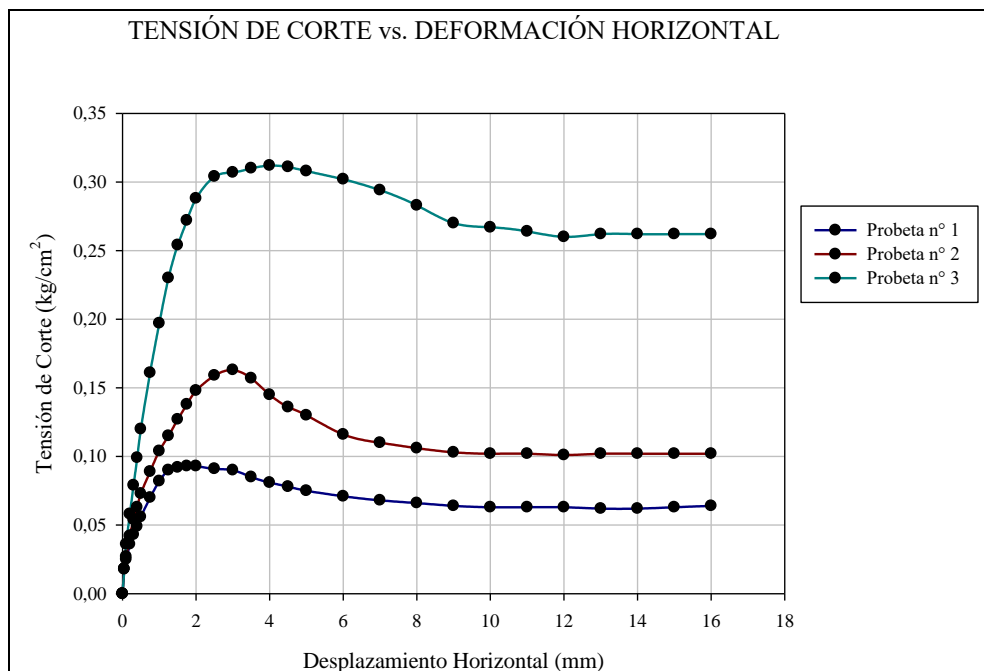


**Figura 15:** Curva Deformación Axial vs Tiempo, ensayo Corte directo probeta n°2.



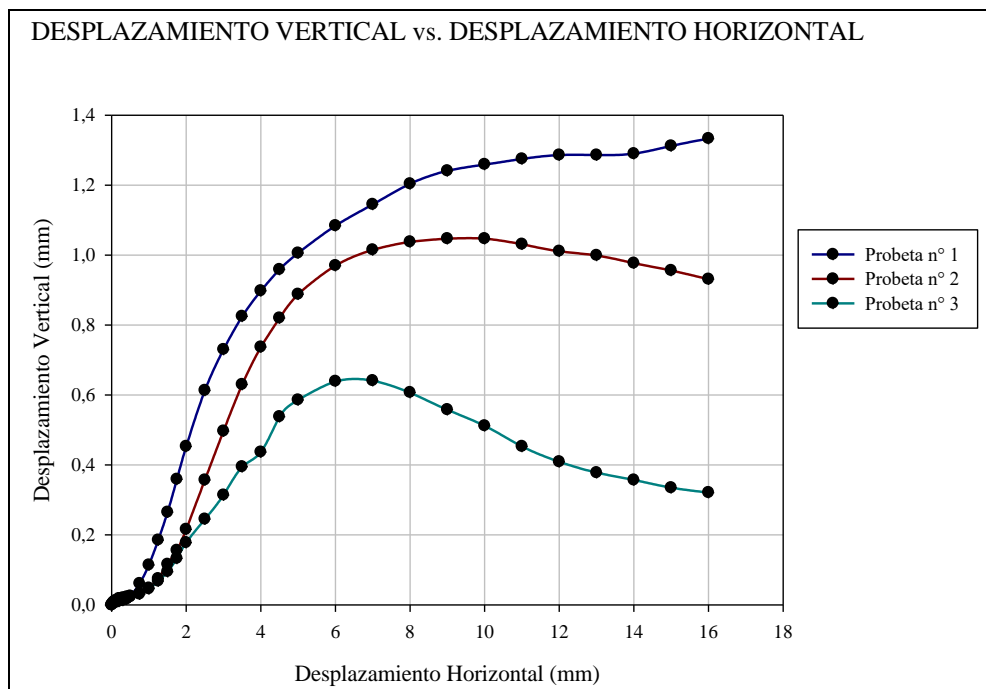
**Figura 16:** Curva Deformación Axial vs Tiempo, ensayo Corte directo probeta n°3.

Se presentan los esfuerzos de corte de la muestra de escoria v/s deformación horizontal (Figura 17) para cada probeta con cargas de 50, 100 y 150 kPa respectivamente. La gráfica describe la respuesta típica para suelos densos, los cuales poseen alta rigidez y resistencia. El esfuerzo cortante alcanza un valor máximo y a continuación decrece tendiendo hacia una resistencia residual.



**Figura 17:** Curva de Resistencia vs Deformación horizontal, ensayo Corte directo.

Durante el corte, se produce un aumento de volumen ya que los granos se encuentran tan imbricados que necesariamente tiene que desencajarse los unos a los otros para que se produzca un desplazamiento entre ellos. Este fenómeno se conoce como dilatancia. El análisis del cambio volumétrico de la muestra de escoria (Figura 18) muestra que alcanzada la resistencia residual ya no se produce variación de volumen.

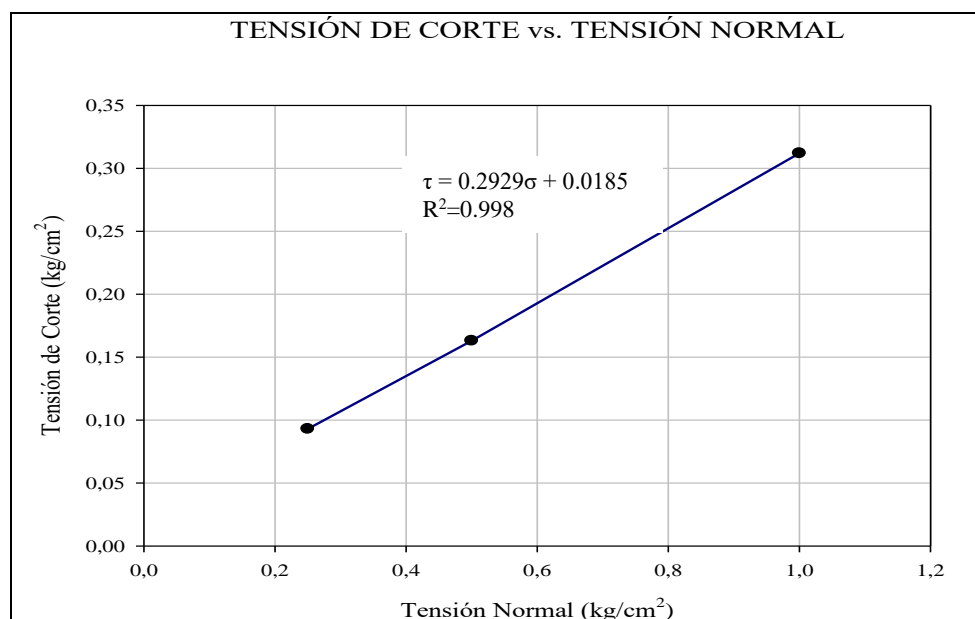


**Figura 18:** Curva de desplazamientos, ensayo Corte directo.

La Tabla 10 muestra las tensiones máximas del material bajo una carga normal, las cuales fueron graficadas en la Figura 19, obteniendo los parámetros resistentes de la muestra de escoria según ecuación 5, los cuales son cohesión ( $c$ )=0,0185 y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) = 16.33. Como se trata de una muestra granular, la cohesión por definición es cero.

**Tabla 10:** Tensiones últimas de la muestra a distinta carga vertical, ensayo Corte directo.

N° Probeta	Tensión de corte máximo (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensión Normal (kg/cm <sup>2</sup> )
1	0,093	0,25
2	0,163	0,50
3	0,312	1,00



**Figura 19:** Representación de estado último de la muestra, ensayo Corte directo.

#### 4.4 Discusión

Luego de los ensayos para determinar las características geotécnicas de la escoria de carbón proveniente de una termoeléctrica, según normas ASTM y el manual de diseño AASHTO para pavimentos (Tabla 11), podemos observar que el material cumple la mayoría de las especificaciones, según la siguiente tabla comparativa.

**Tabla 11:** Especificaciones escoria de carbón según ASTM y ASSTHO.

Ensayos según normas ASTM	Escoria	Especificaciones	Observación
% Pasa malla N°200	5%	5% - 15%	CUMPLE
% Equivalente de Arena	41%	35% mín.	CUMPLE
Límite Líquido	NP	25% máx.	CUMPLE
Límite Plástico	NP	19% máx.	CUMPLE
Índice de Plasticidad	NP	4% máx.	CUMPLE

A través de los valores estipulados por Assis A. (1988) (Tabla 11), es posible clasificar de forma cualitativa el material de escoria ensayado. Se puede apreciar que con un 23% CBR se encuentra en la clasificación Excelente para uso de material Sub-rasante.

**Tabla 12:** Clasificación y uso de suelos según valor de CBR (Assis, 1988)

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

#### 5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir en lo siguiente:

- La caracterización geotécnica de escoria de carbón logró obtener las características de su granulometría, la cual presenta poca cantidad de finos, y una buena distribución de tamaño de partículas, no obstante el ángulo de fricción es relativamente bajo considerando que se trata de un material granular. Sin embargo, considerando además que la escoria no presenta plasticidad, éstas características convierten al material favorable para mejoramiento de carreteras y estabilización de suelos, según normas ASTM y el manual de diseño AASHTO para pavimentos. En construcción de pavimento en las vías puede tener un desgaste mayor por la fricción, pero se puede dosificar para que resista más. Incluso se le podría adicionar a esta mezcla un elemento como las fibras naturales, lo que abre el paso a más estudios de la relación de la escoria de carbón y otros materiales.
- El resultado del ensayo CBR de la escoria de carbón estudiada y estudios previos de Pérez & Collantes (2012), nos demuestran un uso excelente para la escoria como material Sub-rasante. El proceso consistiría en una mezcla homogénea de áridos, escoria granulada de carbón, cal y agua que, convenientemente compactada mejorará sus parámetros de resistencia, ya que las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras.
- Las características físico-químicas del estudio de Robayo et. al (2016) demuestran que la escoria de carbón, acompañadas de un proceso previsible adicional de activación mecánica por medio de molienda, hacen que este subproducto industrial sea potencialmente útil para ser valorado como adición puzolánica en mezclas de concreto auto-compactante con el fin de reducir el elevado consumo de cemento portland en este tipo de mezclas. Uno de los factores limitantes, en relación al uso de las

escorias de termoeléctricas, es su color, ya que son oscuras (debido a la presencia de hollín quemado) puede afectar las características visuales, en este caso, del CAC.

- Esto demuestra la versatilidad de la escoria de carbón, ya que se puede utilizar como agregado fino (previamente molido) y como agregado grueso.
- Además de los beneficios ambientales, otra de las ventajas que otorga el uso de escoria de plantas termoeléctricas está relacionada con la disminución de los costos de producción y la valorización de estos residuos para las centrales, hecho que lo conceptualiza como “ecología industrial”. Este concepto implica que lo que para una empresa puede ser un problema e implicar costos asociados, para otra puede ser un beneficio y valorizar el producto final.

Como recomendación, debido a las condiciones de altas temperaturas que está sometido el carbón en las calderas, el material es muy heterogéneo, por lo cual es necesario realizar una mayor cantidad de pruebas estadísticamente representativas de todos los parámetros involucrados en los usos propuestos para la reutilización de la escoria de carbón.

Es importante también, realizar pruebas que permitan medir la durabilidad al ataque químico y ensayos que permitan determinar las propiedades resistentes con la mezcla de otros materiales industriales, para complementar así los parámetros necesarios para los diseños.

Tener en cuenta también realizar estudios químicos, mineralógicos y medioambientales de las escorias de carbón.

## 6. REFERENCIAS

**ASSTHO.** (1993). Manual diseño de pavimentos.

**ASTM C. 618** (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02

**ASTM C. 989.** (2018) Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken.

**ASTM D. 1557.** (2012): “Estándard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lb/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 1883.** (1999): “Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 2487.** (2011). Práctica estándar para la clasificación de los suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). United States.

**ASTM, D. 3080.** (2003): “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 422.** (2002): “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 4253.** (1996): “Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 4254.** (1996): “Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM, D. 4318.** (2000): “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

- ASTM, D. 5550.** (2001): "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standards.
- Baykal, G., Döven, A.G.** (2000) Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results. Resources, conservation and Recycling.
- Boukendakdji, O., Kadri, E. & Kenai, S.** (2012) "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete", Cement & Concrete Composites, vol. 34, pp. 583-590.
- Código de Normas y de Pavimentación, E. T. D. O.** (2008). Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional.
- Duque, M., Echeverri, O., & Rendón, D.** (2014). Caracterización Mecánica de la Escoria de Carbón para su Uso en la Ingeniería. In XIV Congreso Colombiano de Geotecnia & IV Congreso Suramericano de Ingenieros jóvenes Geotécnicos.
- EFNARC** (2005, May), "The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use", SCC 028, pp. 51
- ENERG, D.** Ministerio de Energía.
- Goñi, M. A.** (2009). Escorias y cenizas volantes de gasificación de carbón. Aplicación a la producción de áridos ligeros expandidos, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Guneyisi, E., Gesoglu, M. & Ozbay, E.** (2009) "Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars", Materials and Structures, vol. 42, pp. 813-826.
- León, M. P., & Ramírez, F.** (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista ingeniería de construcción.
- Luaces, C.** (2010). Los áridos. Historia, clasificación, transformación, reciclado, maquinaria, tecnología y aplicaciones. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos.
- Machado, A.** (2010). Ciencias para el Mundo Contemporáneo. Sevilla, España.
- Manz, O. E.** (1997). Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products.
- Marquina Sierra, M. A.** (2008). Uso de las escorias obtenidas como sub producto de la elaboración de acero de la planta n° 2 de Aceros Arequipa-Pisco para fines de cimentación y pavimentación.
- Medina, A., Gamero, P., Querol, X., Moreno, N., De León, B., Almanza, M., Vargas, G., Izquierdo M., & Font, O.** (2010) "Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization".
- Miranda, R.** (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Universidad Austral de Chile" Valdivia, Chile, Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil.
- Okamura, H.** (1997) "Diseño de Hormigones Autocompactables de Alta Resistencia"; Revista Cemento Hormigón; Pág. 32-33.
- Parra, L.M. y Sánchez D.P** (2010). Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO. Municipio de TUTA Boyacá. Bogotá: Universidad de la Salle, Facultad de ingeniería.
- Perez, R., & Collantes, C.** (2012). Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos (Doctoral dissertation, Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería).
- Quiroga, C.** (2008). Trabajo de Investigación: Tecnologías modernas de plantas termoeléctricas a carbón, impacto en el medio ambiente y costos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Mercados Energéticos.
- Robayo, R. A., Mattey, P. E., Silva, Y. F., & Delvasto, S.** (2014). Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado.

- Robayo, R. A., Mattey, P. E., Silva, Y. F., & Delvasto, S.** (2016). Obtención de un concreto autocompactante empleando adiciones de escoria de carbón finamente molida. Ingeniería y desarrollo.
- Rudnick, H.** (2006) Seguridad energética en Chile: Dilemas, oportunidades y peligros. Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicerrectoría de Comunicaciones y Asuntos Públicos
- Ruiz, M., & Polanco, H.** (1995). Utilización de escorias de carbón en la construcción de capas de pavimentos. In Decimo Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.
- Sanjuan, M. A., Argiz, C., Gálvez, J. C., & Moragues, A.** (2015). Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance. Construction and Building Materials.
- Sear, L.K.A.** (2001). "The Properties and Use of Coal Fly Ash", Thomas Telford, London. 261 pages.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Cientficias, A. T.** (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación.
- Wang, H. & Lin, C.** (2013) "A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC)", Construction and Building Materials, vol. 42, pp. 132-136.
- Ziegert, C.** (2011). "Análisis de muestras de arcilla y mortero de arcillas".