

## “Caracterización geotécnica de cenizas volantes generadas a partir de la combustión del carbón en central termoeléctrica”

*M. Muñoz Adams<sup>1</sup>, R. King St-Onge<sup>2</sup> y J. Montenegro Cooper<sup>3</sup>*

### RESUMEN:

El proceso de generar energía eléctrica mediante la combustión del carbón en centrales termoeléctricas genera residuos tales como cenizas volantes y cenizas de fondo. La generación de cenizas volantes en la región del Biobío es de grandes cantidades. De hecho, se estima que un grupo de centrales termoeléctricas que posee en su conjunto una capacidad de generación de 1.000 MW puede llegar a producir hasta 200.000 toneladas de cenizas al año, esto dependiendo del nivel tecnológico de las plantas. Debido a esto, se ocupan extensos espacios donde se retiene este material. Hoy en día, estos residuos están siendo considerados como insumos tradicionales y diversas compañías han impulsado iniciativas en la búsqueda de diferentes alternativas para su reutilización, por lo que se requiere de un análisis previo del material que proporcione una base para las diferentes áreas en que puedan ser reutilizadas. Esta investigación entrega una caracterización geotécnica de las cenizas volantes la cual se realizó en el laboratorio de geo-materiales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, obteniendo sus características geotécnicas, propiedades de compactación, volumétricas y resistentes para poder dar recomendaciones para su reutilización. Como conclusión, las cenizas volantes al tener un comportamiento similar a la de un suelo blando y fino, sin cohesión, se recomiendan no ser reutilizadas por sí solas. Sin embargo, al no presentar plasticidad y tener una alta resistencia al corte bajo cargas diferentes, la hacen óptima para ser utilizada en aglomerados. Esto da lugar a líneas de investigación en el área de análisis químico, mineralógico y ambiental de las cenizas volantes.

**PALABRAS CLAVES:** Central termoeléctrica; Carbón; Ceniza volante.

### ABSTRACT:

The process of generating electrical energy through coal combustion in thermoelectric plants generates wastes such as fly ash and bottom ash. A large amount of fly ash is generated in the Biobío region. In fact, it is estimated that a group of thermoelectric power plants with a combined generation capacity of 1,000 MW can produce up to 200,000 tons of ash per year, depending on the technological level of the plants. Due to this, extensive areas are occupied to compile and retain this material. Today, these residues are now being considered as primary ingredients and several companies have promoted initiatives searching for different alternatives for their reuse, which is why a prior analysis of the material is required to provide a base for the different areas in which they can be reused. This investigation provides a geotechnical characterization of fly ash, which was carried out in the geo-materials laboratory of the Universidad Católica de la Santísima Concepción, obtaining its geotechnical characteristics, compaction, volumetric and resistant properties in order to provide recommendations to its reuse. The study concludes that the fly ash has a behavior similar to a soft and fine soil, without cohesion, and it is recommended not to be reused by itself. However, by not presenting plasticity and having high resistances hearing under different loads, the ash could be optimal to be used in agglomerates. Further research in the chemistry, mineralogical and environmental areas of the fly ash is recommended.

**KEYWORDS:** Thermoelectric plants; Coal; Fly Ash.

---

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

### 1.1 Introducción

El uso de material puzolánico para producir concreto se remonta hace más de 2000 años en las antiguas civilizaciones de Grecia y Roma, cuando la ceniza volcánica fue mezclada con caliza pulverizada para producir cemento hidráulico. Muchas estructuras utilizan tal mezcla, por ejemplo el Panteón Romano, donde la ceniza volcánica se utilizó como material puzolánico en la cúpula de concreto (Thomas et al., 2017). De hecho, el nombre del municipio italiano Pozzuoli localizado en la ciudad metropolitana de Nápoles se debe al término puzolánico, dado a que se ubica en una fuente de ceniza volcánica cerca del volcán Vesubio.

Si bien el potencial uso de la ceniza volante como material puzolánico se dio a conocer a principios del siglo pasado (Anon, 1914), el uso de la ceniza volante no ha sido significativo hasta el año 1930. El trabajo pionero de Carlson et al. (1937) y la universidad de California, Berkeley, fueron quienes abrieron las puertas para el primer mayor uso en la construcción de la presa Hugry Horse en Montana (USBR, 1948). Hoy en día, el uso de la ceniza volante como material puzolánico en la producción de concreto se da en todo el mundo, ya sea ceniza volante adicionada directamente al concreto como un ingrediente por separado o como un componente mezclado con cemento. El concreto con ceniza volante ha sido utilizado en muchas de las grandes estructuras, por ejemplo, el Sunshine Skyway (Florida), el puente de la Bahía San Francisco en California, túnel Channel entre Inglaterra y Francia, la presa Three Gorges en China, y actualmente el edificio más alto en el mundo, Burj Khalifa en Dubai de 828 metros de altura (Thomas et al., 2017). Además del uso de las cenizas en la industria cementera, estas han sido estudiadas en otros ámbitos, por ejemplo, en aplicaciones ambientales como material adsorbente para la remoción de cobre y plata en aguas residuales e industriales, o también, en la síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes (Querol et al., 1997) y estabilización de suelos expansivos con agregados de cenizas de salvado de trigo junto a un agente estabilizador como cenizas volantes (Khaja y Chethan, 2018). Para cualquier uso de las cenizas es fundamental obtener sus propiedades y características que dependen del tipo carbón del que se generan y del tratamiento que se le aplica en las centrales termoeléctricas para su combustión.

La central termoeléctrica donde se obtuvo la muestra para este estudio está ubicada en la región del Biobío. La muestra se obtuvo del precipitador electrostático en estado seco, de esta forma se conservan las propiedades químicas de la muestra (Pardo, 1993). En tal central termoeléctrica disponen de 6 camiones de capacidad máxima de 23 toneladas para llevar las cenizas a una cancha de acopio ubicada a 13 kilómetros, donde son depositadas sobre una base estabilizadora e impermeable, de manera de evitar que cualquier agua se ponga en contacto con las cenizas, y otros 15 camiones que transportan las cenizas a industrias cementeras. En total se generan aproximadamente 380 toneladas de cenizas al día en el proceso de combustión del carbón y un 10% de esto pertenece a escorias. Las cenizas húmedas son compactadas en la cancha de acopio y dispuestas sobre una base previamente tratada acotada por taludes de pendientes 1:4. El suelo natural acotado se cubre con un geotextil y sobre este una capa de grava de 3'' permitiendo el drenaje de las aguas de lluvia, por encima una capa de arcilla de 30 cm, una capa de grava de 1'', arena, un geotextil y sobre esto se depositan las cenizas que son cubiertas por una capa impermeable donde se le permite, en un punto, el drenaje y en otro punto el drenaje a través del talud. Las cenizas son compactadas en capas de 50 cm y están dispuestas una sobre otra en pisos acotados por los taludes y estos están bordeados por una capa vegetal. Las aguas drenadas en los puntos mencionados anteriormente son tratadas de modo que las aguas mezcladas con cenizas sean separadas mediante floculantes, cloruro férrico y posteriormente llevadas a un estero.

Dado que no se reutiliza el total de cenizas volantes generadas en la central termoeléctrica, este estudio busca obtener una caracterización que permita abrir caminos a más usos de las cenizas ya sea en forma aglomerada como sustituto parcial del cemento en hormigones, fabricación de ladrillos, mezcla de áridos, aditivos sustitutos en la industria cerámica, o en bruto como en aditivo para suelos, material de relleno para minería o construcción de caminos y material para pavimentos. Por lo tanto, el enfoque principal de esta investigación es obtener una caracterización geotécnica de las cenizas volantes provenientes del precipitador

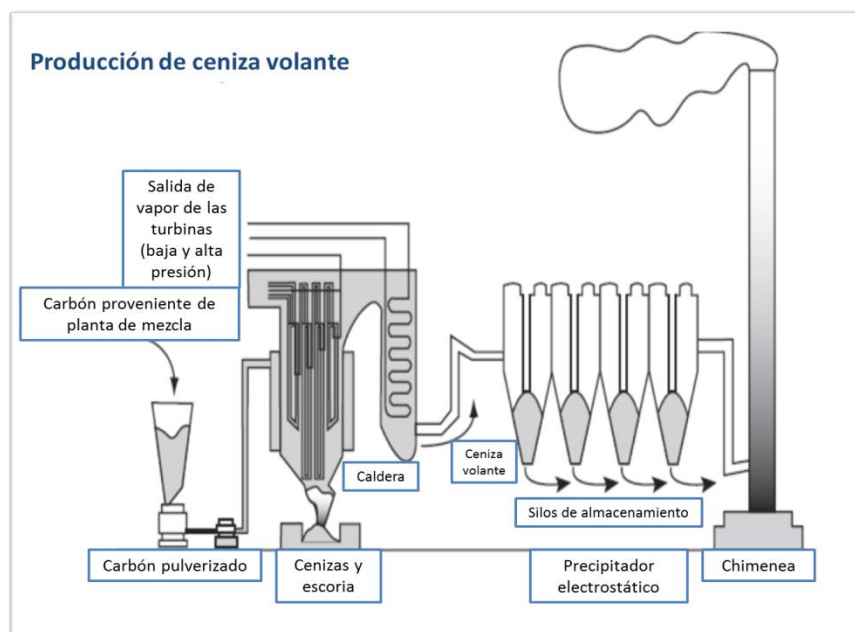
electrostático de la central termoeléctrica. De acuerdo a este enfoque, el estudio se concentró en: a) Caracterización del material, b) Propiedades de compactación, c) Estabilidad volumétrica y d) Propiedades resistentes. Los ensayos geotécnicos se realizaron en el laboratorio de geo materiales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Proceso de combustión del carbón en centrales térmicas y generación de cenizas

En las centrales termoeléctricas tradicionales se quema combustible en una caldera para producir vapor el cual se expande transformando la energía del flujo en energía mecánica en una turbina de vapor que impulsa un alternador (Figura 1). Posteriormente, el vapor es enfriado en un Condensador. En la caldera, las temperaturas alcanzadas por la combustión del carbón alcanzan aproximadamente los 1500°C, donde los minerales inorgánicos (como el cuarzo, calcita, yeso, piritita, feldspatos y arcilla) se funden en el horno y se fusionan (Argiz C. et al., 2015). Posteriormente, tal fusión al ser transportada por los gases de combustión, al quedar libres de la zona de combustión y enfriarse, forman partículas esféricas vítreas llamadas cenizas volantes, las cuales son captadas mediante precipitadores electrostáticos

De acuerdo al tipo de combustión en las centrales termoeléctricas se pueden clasificar como: 1) Centrales de ciclo convencional que obtienen la energía mecánica para mover el rotor del generador a partir del vapor generado en la caldera, 2) Centrales de ciclo combinado donde se usan los gases de la combustión del gas natural para mover una turbina de gas y los gases residuales se aprovechan en una caldera de recuperación para generar vapor que se introduce posteriormente en una turbina de vapor y 3) Centrales turbo gas de ciclo abierto que se caracterizan por tener una turbina especialmente diseñada para transformar la combustión de un gas a alta presión en el movimiento de un eje solidario al rotor del generador, a través de los que se obtiene energía eléctrica

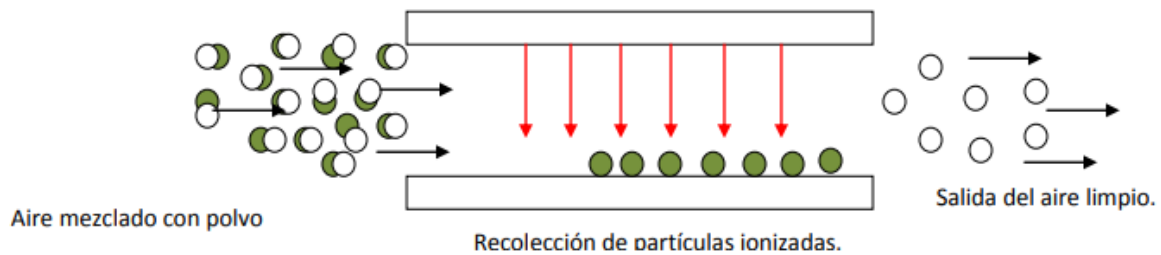


**Figura 1.** Esquema de producción de cenizas volantes en una central térmica tradicional. (Modificado de Sear, 2001)

### 2.2 Medidas de control medioambiental

Como medida de mitigación, para el abatimiento de material particulado (principalmente cenizas), los gases producidos después de la calcinación son llevados a un precipitador electrostático el cual es un dispositivo de control de partículas que utiliza fuerzas eléctricas para mover las partículas – en este caso cenizas volantes – fuera de la corriente de gas y sobre placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica

forzándolas a que pasen a través de una corona, una región en la cual fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo. Una vez que las partículas son recolectadas sobre las placas, deben ser removidas de las placas sin que se re-encaucen en la corriente de gas. Esto se logra usualmente desprendiéndolas de las placas, permitiendo que la capa de partículas recolectadas se deslice hacia una tolva desde la cual son evacuadas. En la Figura 2 se puede observar el principio de funcionamiento donde se acumula carga en dos placas cargadas con polaridades opuestas como en un condensador y el aire que entra al sistema entra en contacto inmediatamente con las cargas producidas entre las placas. Cabe destacar que este es uno de los métodos más utilizados en el control de material particulado.



**Figura 2.** Principio de funcionamiento de recolección de partículas ionizadas (Becerra, 2010)

Para el abatimiento de dióxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ), entre las tecnologías más utilizadas se encuentran la desulfuración con agua de mar que utiliza el agua de mar para absorber y neutralizar el dióxido de azufre, transformándolo en sulfatos disueltos, los cuales son devueltos al mar. Este método es similar a la desulfuración por vía húmeda - donde los gases de combustión se saturan con agua y se utiliza carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como reactivo con el objetivo de transformar el dióxido de azufre a yeso (sulfato de calcio,  $\text{CaSO}_4$ ) - que a diferencia del método anterior, no se necesita de reactivo sólido.

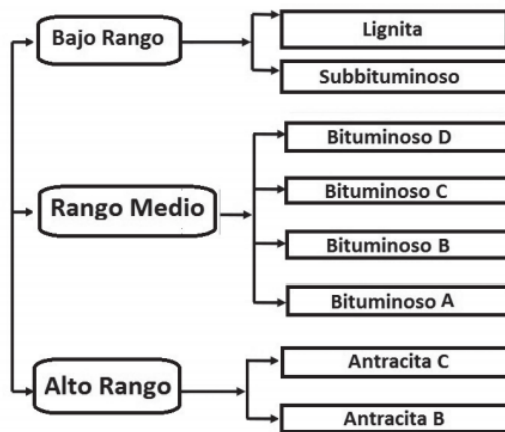
Los combustibles con altos contenidos de nitrógeno, en el proceso de su combustión se generan óxidos de nitrógeno. Para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno se toman medidas primarias que consisten en modificaciones en la combustión para reducir su formación y medidas secundarias donde se tratan los efluentes para eliminar los  $\text{NO}_x$ , de forma posterior a la combustión.

Hoy en día las emisiones de las centrales termoeléctricas son mínimas y se rigen por normas ambientales de cada país. La central de donde provienen las cenizas de este estudio fue construida con tecnología moderna para abatir sus emisiones. Dispone de un precipitador electrostático de última generación en materia de abatimiento, que retiene por sobre el 99,99% del material particulado. Es así como central emite 45 veces menos de material particulado que el permitido por la Norma para Centrales Termoeléctricas (D.S. N°13/2011).

### 2.3 Influencias de los tipos de carbón en la generación de cenizas

Dentro de los distintos combustibles fósiles en el mundo, el carbón representa el 70% de esas reservas con una relación de reservas/producción en torno a 126 años (Barrera et al., 2014). En la generación de energía, las propiedades físicas y químicas del carbón permiten obtener un conocimiento del rendimiento de los procesos energéticos donde estos son materia prima. La normativa ISO 11760-2005 emplea un sistema para clasificar los carbones de acuerdo a un rango (Figura 3) lo que depende de su poder calorífico y porcentajes de carbono fijo y materia volátil.

El carbono fijo es una proporción que se consume en el proceso de combustión del carbón para producir energía y se obtiene de la diferencia de 100 a la suma de los contenidos (en porcentajes) de humedad, volátiles y cenizas del carbón secado al aire. Por lo tanto, el contenido de cenizas del carbón dependerá de la cantidad de carbono fijo que este tenga, que a su vez, mientras mayor es el rango, menor es el contenido de cenizas que se generará en el proceso de combustión.



**Figura 3.** Clasificación de los carbones, según norma ISO 11760-2005

La norma ASTM D388 define a los carbones de alto rango aquellos que tienen un poder calorífico mayor a 26,8 MJ/kg y de menor rango los que tienen un poder calorífico menor a 26,5 MJ/kg. Así, a mayor rango, mayor es el poder calorífico y contenido de carbono fijo del carbón. En la Tabla 1 se clasifican los tipos de carbón por rango de acuerdo a la norma ASTM D 388.

**Tabla 1.** Clasificación de los carbones por rango de acuerdo a la norma ASTM D388. CF: Carbono fijo, MV: Material volátil, PC: Poder calorífico,

Tipo	CF (%)	MV (%)	PC (BTU/lb)	PC (MJ/kg)	PC (kcal/kg)
<b>Antracita</b>	86 - 98	2 - 14			
<b>Bituminoso</b>	69 - 78	14 - 31	10500 - 14000	24,5 - 32,6	5800 - 7780
<b>sub-bituminoso</b>			9500 - 10500	22,1 - 24,5	5290 - 5860
<b>Lignito y turba</b>			6300 - 8300	14,7 - 19,3	3500 - 4600

En general, para que el carbón sea utilizado en una central térmica se requiere que este tenga un alto poder calorífico, bajo contenido en cenizas, humedad total entre 4 y 8%, materia volátil entre 20 y 35%, bajo contenido de azufre (0,8 – 1,1%), tamaño máximo de partículas entre 40 y 130 mm y bajo índice de hinchamiento.

## 2.4 Clasificación de las cenizas volantes

Las cenizas son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales termoeléctricas. Los productos de esta combustión se subdividen en cenizas volantes y escoria. Las cenizas volantes son residuos volátiles obtenidos a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera (ver apartado 2.1). La ceniza volante es un material puzolánico, el cual es un aluminosilicato amorfo con cantidades variables de calcio. Sus propiedades varían ampliamente según la composición del carbón, tipo y geometría de la caldera donde se tiene lugar la combustión, el residuo de cenizas, el grado de pulverización y el tipo de colectores empleados. Aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción, sus propiedades físicas y químicas presentan cierto rango de variación. Las escorias, por su parte, se obtienen desde el fondo del hogar de la caldera y el tamaño de sus partículas es entonces mayor que el de las cenizas volantes. Su producción corresponde al 20 %, aproximadamente, del total de cenizas obtenidas.

Clasificación de las cenizas volantes de acuerdo a la norma ASTM C618:

- **Clase F:** Cenizas volantes producidas normalmente a partir de la combustión de antracitas y carbones bituminosos y cuya suma de óxidos ácidos es mayor del 70%
- **Clase C:** Cenizas volantes producidas normalmente a partir de la combustión de lignitos y carbones subbituminosos y cuya suma de óxidos ácidos es mayor del 50%. En algunos casos pueden llegar a contener proporciones superiores al 10 % de cal libre (CaO).

De acuerdo a su composición (Norma ASTM C618):

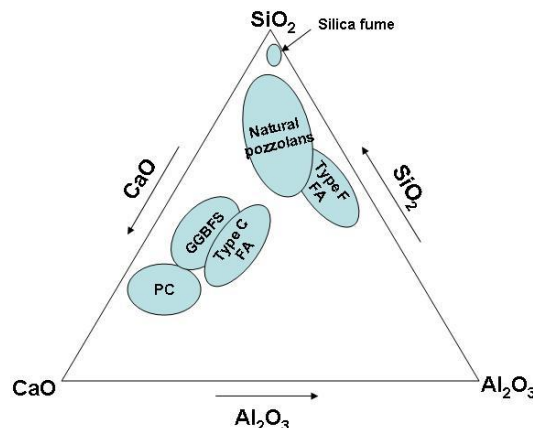
- **Silico-Aluminosas:** Se corresponden a las de la clase F, de carácter exclusivamente puzolánico. Reaccionan lentamente con la cal y los álcalis
- **Sulfo-Cálcicas:** se corresponden con las de la clase C, de gran hidraulicidad. Reaccionan formando rápidamente aluminato cálcico hidratado y etringita.
- **Silico-Cálcicas:** Corresponden a un nivel intermedio entre las clases F y C, débilmente hidráulicas. Forman etringita, aluminato cálcico hidratado y gehlenita hidratada.

Muchas cenizas volantes generadas a partir de lignitos o carbones sub-bituminosos reúnen los requerimientos químicos de las cenizas volantes de clase F ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$ ). Tales cenizas pueden ser clasificadas como clase F o clase C y algunas veces son referidas como clase F/C o C/F. En Canadá, CSA A300 (Cementitious Materials for Use in Concrete) cubre las especificaciones de las cenizas volantes, la cual las divide en tres tipos basados en el calcio contenido en las cenizas (Tabla 2).

**Tabla 2.** Especificaciones para las cenizas volantes según ASTM C618 y CSA A300

	Clase	Requerimientos químicos
ASTM C 618	F	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 70\%$
	C	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \leq 50\%$
CSA	Tipo F	< 8% CaO
	Tipo CI	8 - 20% CaO
	Tipo CH	> 20% CaO

En la Figura 4 se muestra en un diagrama ternario la composición de diferentes materiales como cenizas volantes clase F (Type F FA), cenizas volantes clase C (Type C FA), cemento Portland (PC), escoria granular de horno (GGBFS por sus siglas en inglés ground granulated blast furnace slag), humo de sílice (SF) y material puzolánico natural (natural pozzolans). Se puede notar que los materiales con mayor contenido de  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  son las cenizas volantes clase F, material puzolánico natural y el humo de sílice, y por otro lado, los materiales con mayor contenido de CaO son las cenizas volantes clase C, el cemento Portland y la escoria granular de horno.



**Figura 4.** Diagrama ternario que muestra la composición de diferentes materiales. PC (cemento Portland), GGBFS (escoria granular de horno), Type F FA (ceniza volante clase F), Type C FA (ceniza volante clase C) y Natural pozzolans (material puzolánico) (Fuente: [www.theconcreteportal.com/admix\\_min.html](http://www.theconcreteportal.com/admix_min.html))

## 2.5 Composición química y mineralógica

Las propiedades químicas de las cenizas volantes dependen de la composición del carbón, las condiciones de operación, el tipo de incineración y el sistema de control de contaminación del aire. Los óxidos más comunes encontrados en las cenizas son  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SO_3$  y  $Na_2O$ . En la Tabla 3 se muestra la composición química de cenizas volantes de estudios realizados en centrales termoeléctricas de diferentes países. En el caso de las cenizas francesas -(1) cenizas Sílico-Aluminosas y (2) cenizas Sulfo-Cálcicas- Se puede notar la diferencia notoria en el contenido de sílice y óxido de calcio (Andrieux y Colombel, 1976).

**Tabla 3.** Composición química de las cenizas volantes de estudios realizados en centrales termoeléctricas de Chile (Ossa y Jorquera, 1984), España (Peris et al, 1991), Francia (Andrieux y Colombel, 1976), Estados Unidos (Fernández, 1986) y Sudáfrica (Leonard y Bailey, 1982).

- no se tiene registro.

Componentes	Cantidad, %					
	Chile	España	Francia (1)	Francia (2)	EE.UU	Sudáfrica
Sílice ( $SiO_2$ )	49,1	44,74	50	18	50,15	47,6
Oxido de aluminio ( $Al_2O_3$ )	26,18	24,32	30	12	29,9	15,2
Oxido férrico ( $Fe_2O_3$ )	14,63	16,02	7	7	13,3	8,8
Oxido de magnesio ( $MgO$ )	1,13	0,7	1,8	1,8	1,0	Trazas
Oxido de calcio ( $CaO$ )	5,84	8,51	2,5	45	-	1,8
Trióxido de azufre ( $SO_3$ )	0,58	0,98	0,5	6	-	-
Oxido de sodio ( $Na_2O$ )	1,52	0,42	5,8	8,2	-	0,1
Cloruros ( $Cl^-$ )	Trazas	-	-	-	-	-
Oxido de potasio ( $K_2O$ )	0,77	0,92	5,8	8,2	-	0,1

Algunas de las variaciones más pronunciadas se pueden observar en el contenido de sílice, óxido de calcio y trióxido de azufre que varían, por una parte, por el tratamiento de la planta en que se generan y, por otra, el tipo de carbón utilizado en el proceso de generación de energía.

En la Tabla 4 se puede observar que los minerales más abundante en las cenizas son el vidrio aluminosilicatado junto a la mullita ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) y el cuarzo ( $SiO_2$ ). En las cenizas volantes el MgO no aparece en su forma cristalizada (periclasa), sino que entra como modificador en la red formada por el silíceo en la fase vítrea.

**Tabla 4.** Composición mineralógica de las cenizas volantes, en % peso (Fly Ash Resource Center, 2001)

Fase	%
Vidrio aluminosilicatado	50-90
Mullita ( $Al_6Si_2O_{13}$ )	3-40
Cuarzo ( $SiO_2$ )	3-15
Magnetita ( $Fe_3O_4$ )	0,1-3,5
Hematita ( $Fe_2O_3$ )	<0,3-6
Cal libre ( $CaO$ )	<0,1-6
Periclasas ( $MgO$ )	-
Anhidrita ( $CaSO_4$ )	0,2-15
Tridimita ( $SiO_2$ )	-
Calcita ( $CaCO_3$ )	<0,3-0,6
Feldespatos	<0,1-3

Registros anteriores (facilitados por la central termoeléctrica de la cual provienen las cenizas volantes de este estudio) de una caracterización química realizada a las cenizas volantes de este estudio mediante Barrido Inorgánico Semicuantitativo (Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X) (Tabla 5), indican que las cenizas son no activas (Ceniza Sílico-Aluminosa).

De acuerdo a los porcentajes en peso de los elementos que contienen las cenizas (Tabla 5), el índice de basicidad que relaciona la proporción de sustancias alcalinas o básicas es calculado mediante el sistema de ecuación:

$$B_2 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} = 0,04 \quad \text{Ec. 1}$$

Para un valor mayor que 1 el índice de basicidad  $B_2$  indica que la muestra se comporta como una base. En este caso la muestra se comporta como un ácido dado el alto contenido de  $SiO_2$ .

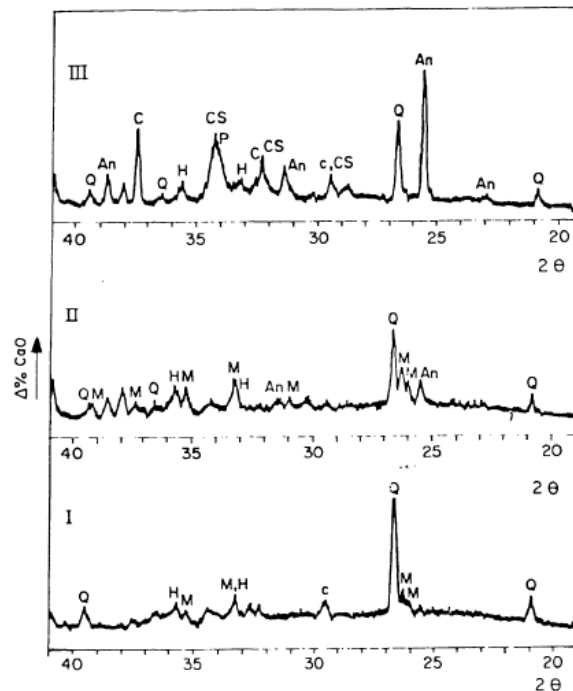
La propiedad más importante de las cenizas Sílico-Aluminosa es su carácter puzolánico que es mayor que en muchas puzolanas naturales y artificiales (Pardo, 1993). Aunque no son propiamente un cemento, a temperatura ordinaria fijan paulatinamente la cal dando lugar a un producto aglomerante en presencia de agua. Este poder puzolánico se manifiesta por dos fenómenos: combinación con la cal para dar compuestos insolubles, y endurecimiento.

**Tabla 5.** Caracterización química inorgánica (los resultados están expresados en porcentaje en peso, base natural)

Elemento	Expresado como	% Peso
Aluminio	$Al_2O_3$	12,8
Arsénico	$As_2O_3$	<0,01(*)
Bario	$BaO$	0,79
Calcio	$CaO$	2,08
Cloruro	$Cl$	<0,01(*)
Cromo	$Cr_2O_3$	0,11
Cobre	$CuO$	0,1
Hierro	$Fe_2O_3$	22,2
Potasio	$K_2O$	2,19
Magnesio	$MgO$	0,46
Manganeso	$MnO$	<0,01(*)
Sodio	$Na_2O$	<0,01(*)
Fosforo	$P_2O_5$	1,95
Rubidio	$Rb_2O$	0,05
Azufre	$SO_3$	0,31
Silicio	$SiO_2$	50
Estroncio	$SrO$	0,31
Titanio	$TiO_2$	1,33
Vanadio	$V_2O_5$	0,05
Yodo	$I_2O_3$	0,02
Zinc	$ZnO$	<0,01(*)
Zirconio	$ZrO_2$	0,1

(\*) Valor se encuentra bajo el límite de detección

Mediante difractogramas de rayos-X que realizaron a cenizas volantes provenientes de centrales térmicas españolas (Luxan et al., 1988), la mullita (M) aparece en cenizas volantes de bajo contenido en cal, mientras que las cenizas de alto contenido en cal presentan otros componentes cristalinos como son la portlandita, anhidrita (que ha sido detectada en cenizas volantes procedentes de lignitos, y en aquellas de mezclas de hulla y antracita, pero no en cenizas de hulla), cal libre y silicatos cálcicos (Figura 5). El cuarzo y hematita se ha encontrado tanto en cenizas de alto como de bajo contenido en cal, así como la presencia de calcita.



**Figura 5.** Difractograma de rayos-X a cenizas volantes procedentes de centrales térmicas españolas

## 2.6 Propiedades físicas y geotécnicas

Debido a la alta temperatura y arrastre rápido de las partículas con los gases de chimenea, se propicia una condición favorable para el desarrollo de forma esférica de las partículas de las cenizas volantes. El tamaño de las partículas varía entre 1  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$  y son traslucidas en su mayoría con pesos específicos que suelen estar comprendidas entre los valores 1,9 y 2,8  $\text{g}/\text{cm}^3$  y un punto de fusión entre los 950 y 1550°C.

Los factores que destaca Raymond (1961) en las variaciones entre las curvas de compactación y los valores que alcanzan las densidades máximas y humedades óptimas de cenizas volantes de diferentes centrales de Europa son el grado de pulverización del carbón y el diseño de la caldera, factores que afectan la granulometría de las cenizas y por tanto a los parámetros de compactación. Otro aspecto considerable son las bajas densidades secas alcanzadas, que se deben en parte, al bajo peso específico y estructuras de las moléculas. En la Tabla 6 se muestran valores de densidades máxima, humedad óptima y peso específico de cenizas norteamericanas obtenidas en ensayo Proctor modificado (Leonards, 1982).

**Tabla 6.** Resultados de ensayos de compactación sobre cenizas norteamericanas (Leonards, 1982).

Ceniza Volante	Densidad Máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad Óptima (%)	Peso Específico Aparente
Central Perry <<k>> (Indianápolis)	1,0 - 1,2	28 - 39	2,25 - 2,53
Cenizas Michigan	1,2 - 1,5	20 - 32	2,36 - 2,61
Cenizas del Este de EE.UU.	1,2 - 1,7	13 - 30	2,1 - 2,6
Cenizas de West (Pennsylvania)	1,2 - 1,4	19 - 32	2,29 - 2,59

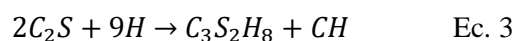
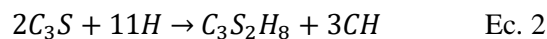
Mediante ensayos de inundación, donde la muestra de ceniza a sido sometida a compactación a diferentes densidades y sobre cargas, se ha estudiado el hinchamiento. Goelen (1982) ha registrado hinchamientos de hasta 15 %, pero con sobre cargas muy pequeñas.

El comportamiento resistente de las cenizas volantes se relaciona con su carácter puzolánico, que permite que en pequeñas cantidades de cal en la composición de la ceniza, se produzca un aumento de resistencia de material compactado con el tiempo. Teniendo en cuenta el tamaño de las partículas de las cenizas, la resistencia al corte, y en concreto el ángulo de rozamiento alcanza valores relativamente altos que superan normalmente los 30 ° (Pardo, 1993).

## 2.6 Uso de las cenizas volantes en la industria cementera y en otras áreas

Hay dos principales aplicaciones para las cenizas en la producción de cemento, primero como materia prima para producir Clinker Portland, que es el principal componente del cemento Portland, y segundo como aditivo puzolánico. La ceniza al ser mezclada con cemento Portland y agua, reaccionará con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland para producir diversos hidratos de silicatos de calcio (C-S-H) e hidratos de aluminato de calcio. Además, algunas cenizas volantes con grandes cantidades de calcio mostrarán un comportamiento cementoso por la reacción con el agua para producir hidratos en ausencia de una fuente de hidróxido de calcio. Estas reacciones puzolánicas son beneficiosas para el concreto en el sentido de mejorar la calidad de la fase aglutinante cementoso (C-S-H), mejorando la resistencia a largo plazo y reduciendo la permeabilidad del sistema.

La hidratación de los compuestos de silicato de calcio,  $C_3S$  (alita) y  $C_2S$  (belita), en el cemento Portland pueden ser representados como:



El rol de la ceniza volante en el concreto está fuertemente influenciado por sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Las composiciones químicas y mineralógicas dependen en gran medida de la composición del carbón y los tipos de este (antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito). Otra aplicación de las cenizas volantes es el rol que cumple en el concreto compactado con rodillo o RCC (por sus siglas en inglés) que se utiliza en la construcción de carreteras, presas o grandes edificios. La utilización de cenizas volantes en la construcción de presas de hormigón puede disminuir la deformación del hormigón de la presa y reducir su contracción y expansión. Además, han sido utilizadas en la estabilización de terraplenes, pavimentos, relleno de base y sub-base, entre otros, donde sus características puzolánicas proporcionan resistencia al corte, dureza y durabilidad a la estructura (Argiz et al., 2015).

En el ámbito medioambiental, en los años recientes se ha estudiado las cenizas volantes en el rol como material adsorbente para limpieza de gases de combustión compuestos de azufre, NOx, mercurio y gases

orgánicos entre otros contaminantes. En el tratamiento de aguas residuales, se ha estudiado la eficacia de las cenizas en la remoción de cobre y plata gracias a su alta área superficial específica (Carrillo et al., 2012), la eficiencia de la remoción se asemeja a la eficiencia de materiales adsorbentes naturales, como zeolitas, diatomita y carbón sub-bituminoso.

### 3. METODOLOGÍA

En este estudio se analizó una muestra representativa de cenizas volantes provenientes de la combustión del carbón utilizado en la generación de electricidad, obtenida de una central termoeléctrica ubicada en la región del Biobío. Las cenizas volantes han sido almacenadas en un contenedor metálico hermético - para no contaminar y alterar el material - en el cual se han alojado aproximadamente 200 kg de la muestra. Dada la forma esférica de las partículas de cenizas volantes y su comportamiento similar a un suelo, se sometieron a ensayos geotécnicos para obtener su caracterización empleando las normas ASTM. Para los ensayos geotécnicos, se utilizó la porción de cenizas bajo la malla n°40 y así evitar algún residuo o contaminante que no pertenezca al material y obtener una muestra homogénea y lo más representativa posible.

La caracterización geotécnica del material se divide en cuatro grupos los cuales consisten en obtener la caracterización del material, propiedades de compactación, estabilidad volumétrica y propiedades resistentes. Cada grupo se divide en los ensayos mostrados en la Tabla 7 bajo las normas ASTM mencionadas

**Tabla7.** Metodología ensayos geotécnicos y normas

	<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
<b>Caracterización del material</b>	Granulometría	ASTM D 422
	Límites de Atterberg	ASTM D 4318
	Densidad de partículas solidas	ASTM D 5550
<b>Compactación</b>	Proctor	ASTM D 1557 y ASTM D 698
	Densidad máxima y mínima	ASTM D 4253 y ASTM D4254
	CBR (California Bearing Ratio)	ASTM D 1883
<b>Estabilidad volumétrica</b>	Hinchamiento libre	ASTM D 4546
	Potencial de expansión	ASTM D 4792
	Colapso	ASTM D 5333
<b>Propiedades resistentes</b>	Corte directo	ASTM D3080

Antes de la realización de los ensayos, el material se preparó de acuerdo a la norma ASTM 421. Posteriormente, para obtener su granulometría, la muestra es secada al horno durante 24 horas y lavada en la malla N°200 para cuantificar el contenido de finos de la muestra. Cabe destacar que debido al gran contenido de material fino de la muestra, se requirió trabajar con elementos de seguridad tales como guantes, antiparras y mascarillas para evitar su inhalación y contacto directo.

#### 3.1 Caracterización del material

La caracterización de las cenizas volantes se realizó mediante granulometría, densidad de las partículas sólidas y límites de Atterberg. Previo a estos ensayos se mezcló el material para obtener muestras lo más homogéneas posibles. Para esto se colocó un nylon en el suelo de tal forma que el material no tenga contacto directo con el suelo. Se vació el material y de este forma se procedió a mezclar y cuartear para obtener dos muestras (lo más representativas posibles) y realizar la granulometría. El material restante se guardó en recipientes herméticos y etiquetados.

El ensayo de granulometría se realizó mediante los tamices n°40 y n°200 con el fin de obtener la cantidad de fino. Primero se lavó el material por la malla n°200 y después de secarlo en el horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas se procedió a tamizarlo en seco. La densidad de partículas sólidas se obtuvo des-aireando 80 gramos de

material en una bomba de vacío con agua destilada en un picnómetro. Este procedimiento se siguió de acuerdo a la norma ASTM D 5550 y se realizaron 3 ensayos con el fin de obtener un dato con la mayor certeza posible. De acuerdo a estudios de otras cenizas, la cenizas volantes no tienen plasticidad, no obstante, se realizó el ensayo para tener una confirmación de esto. El ensayo se realizó siguiendo los procedimientos indicados por la norma ASTM D 4318.

### 3.2 Propiedades de compactación

En esta caracterización los ensayos requeridos para obtener las propiedades de compactación son Proctor normal y modificado, densidad mínima y CBR (California Bearing Ratio) – mediante el ensayo CBR también se obtiene el porcentaje de expansión del material que está dentro de las propiedades de estabilidad volumétrica (apartado 3.2.3)-. El ensayo Proctor permite obtener el comportamiento del material bajo ciertas condiciones de humedad y compactación (Figura 6). Mediante la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor, se procede a obtener el resultado del %CBR de acuerdo a la norma ASTM D 1883. La densidad mínima se determinó de acuerdo a la norma ASTM D 4254. Cabe destacar que el ensayo para calcular la densidad máxima en mesa vibratoria no se pudo realizar ya que por el tamaño de fino de las partículas, al colocar la placa cilíndrica hay una pérdida considerable de material.



**Figura 6.** Probeta ensayada del Proctor modificado

### 3.3 Estabilidad volumétrica

Para el ensayo de potencial de expansión se siguió el procedimiento de la norma ASTM D 4792 donde los implementos ocupados fueron de acuerdo al método D 1883. Se ensayaron dos probetas compactadas a 56 golpes donde el material se mantuvo sumergido en agua a 70°C durante 7 días en moldes de acero inoxidable con forros adhesivos transparentes para permitir la libre expansión del material y sobrecargas de 4,6 kg. Los ensayos de colapso e hinchamiento libre se realizaron en edómetros a la humedad óptima del Proctor.

### 3.4 Propiedades resistentes

Las propiedades resistentes de la muestra se obtuvieron mediante corte directo según la norma ASTM D3080. La muestra se saturó, consolidó y según esto se obtuvo el tiempo de ensayo de corte. El ensayo se realizó a una densidad del 90% del Proctor ya que a más densidad no cabía el material en la caja de corte. El equipo utilizado es de marca HUMBOLDT que trabaja conectado al software HUMBOLDT MATERIAL TESTING (Figura 7).



**Figura 7.** Equipo de corte directo (HUMBOLDT)

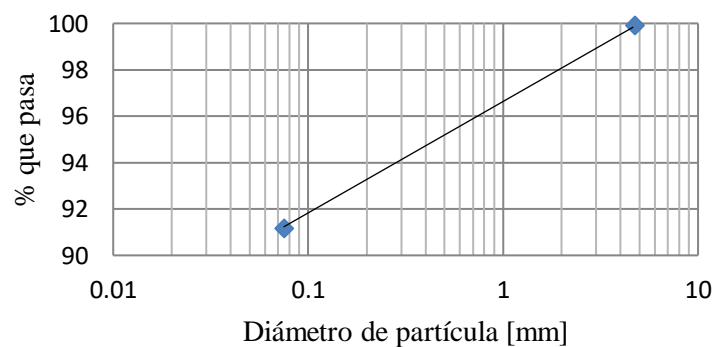
## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterización del material

En la obtención de la cuantificación de finos por granulometría, en el lavado mediante la malla n°200, paso un 91% del material (Tabla 8 y Figura 8) y el material retenido se tamizo por la malla n°4 y 200. De esto se obtuvo que:

**Tabla 8.** Valores obtenidos del ensayo de granulometría

Malla #	abertura	peso retenido	% retenido parcial	%retenido acumulado	%pasa
4	4,75	0,2	0,1	0,1	99,9
200	0,075	17,5	8,75	8,85	91,15
Pasa n°200		182,1	91,05	99,9	0,1
Total fino		200	100		



**Figura 8.** Granulometría sobre malla n°200 de las cenizas volantes

Al realizar el ensayo de plasticidad según la norma ASTM D 4318, se pudo apreciar que las cenizas volantes no tienen plasticidad por lo que se clasifica como no plástica NP. De acuerdo a la norma ASTM la gravedad específica de las partículas sólidas es 2,2

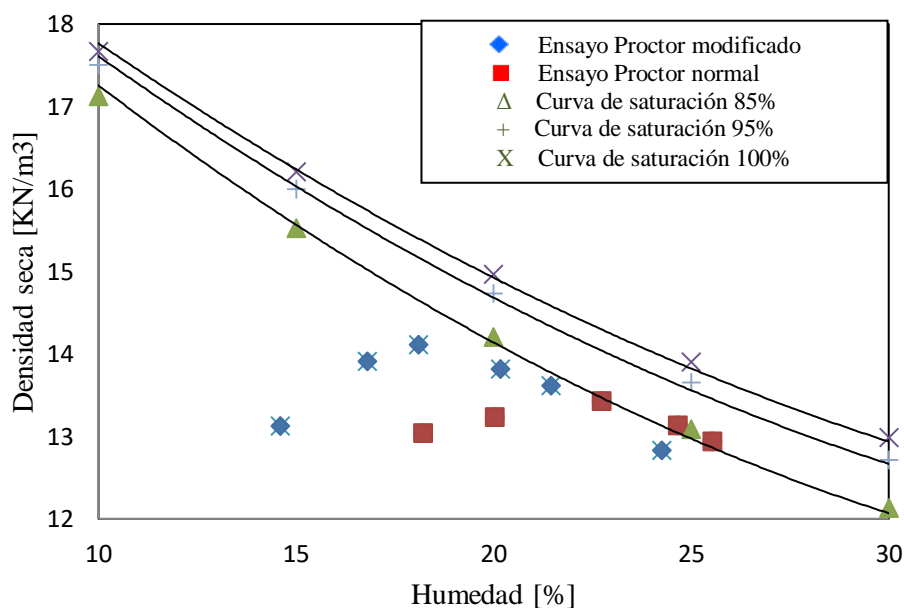
## 4.2 Propiedades de compactación y estabilidad volumétrica

Las ecuaciones que más se ajustan a las curvas de los ensayos de Proctor modificado y Proctor normal (Figura 9) son:

$$y = -0,0428x^2 + 1,6167x - 1,2634 \quad \text{Ec. 4}$$

$$y = -0,0313x^2 + 1,3648x - 1,468 \quad \text{Ec. 5}$$

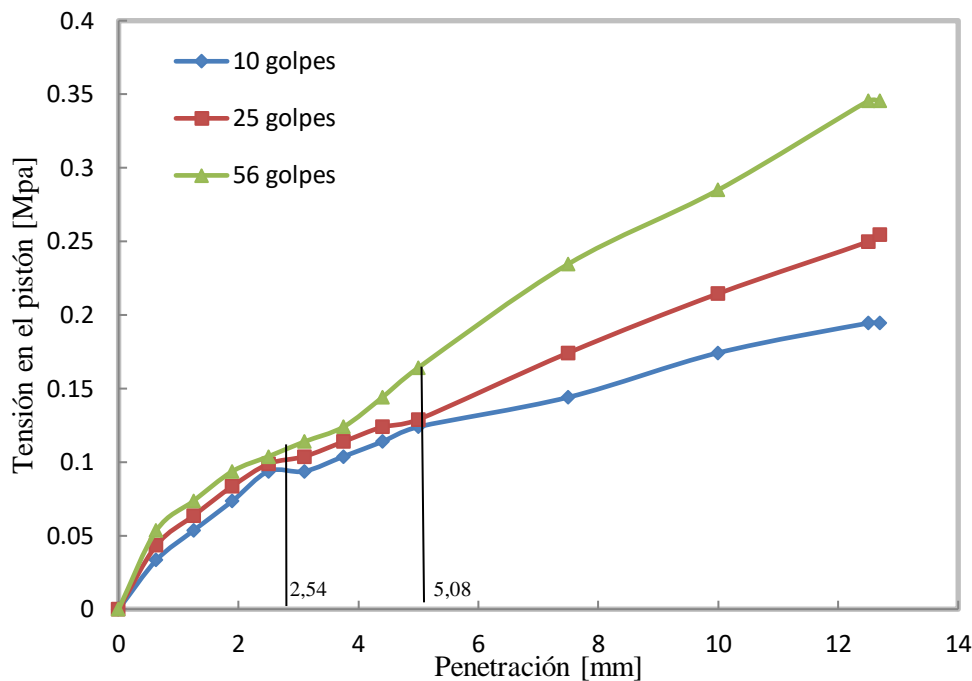
De esto se puede obtener que la humedad óptima y densidad máxima compactada seca del ensayo Proctor modificado son 19% y  $14\text{kN}/\text{m}^3$ , mientras que los valores de humedad óptima y densidad máxima compactada seca del ensayo Proctor normal son 22% y  $13,4\text{kN}/\text{m}^3$



**Figura 9.** Resultados de los ensayos Proctor modificado y Proctor normalizado

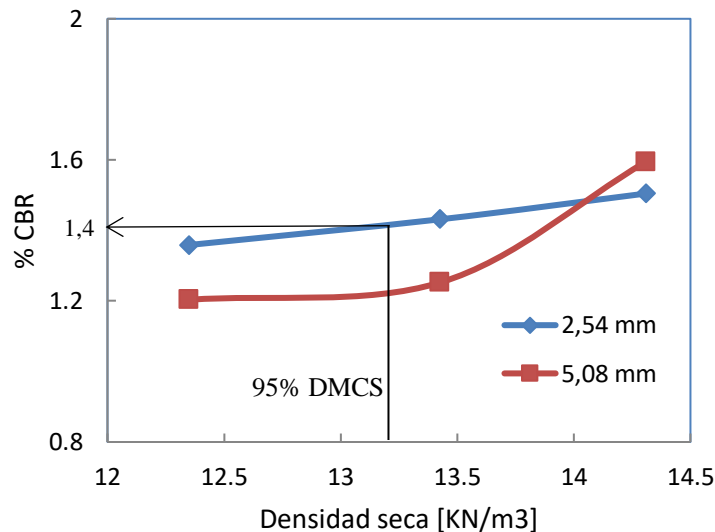
Dado que la energía de compactación en el ensayo de Proctor modificado es mayor que en el ensayo Proctor normalizado, la densidad máxima compactada seca DMCS es notoriamente mayor, no obstante, la humedad óptima es menor por la disminución de humedad en la compactación. Para los cálculos realizados más adelante, donde se requiere ensayar a la humedad óptima, se utilizó el valor obtenido del ensayo Proctor modificado. La densidad mínima seca obtenida de acuerdo a la norma ASTM D4254 es de  $7,9\text{kN}/\text{m}^3$ .

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 cenizas ensayadas (Figura 10). El tiempo que se mantuvieron las probetas sumergidas en agua fue de 96 horas tal como lo indica la norma bajo una sobrecarga de 4,5 kilogramos. Por motivos de comparación de hinchamientos con el ensayo de potencial de expansión se tomaron medidas de 2 muestras compactadas a 56 golpes. Los resultados de expansión medidos pasado las 96 horas fueron de 3,9% y 4,7% con densidades secas (antes de sumergir) de  $14,1\text{kN}/\text{m}^3$  y  $13,8\text{kN}/\text{m}^3$ .



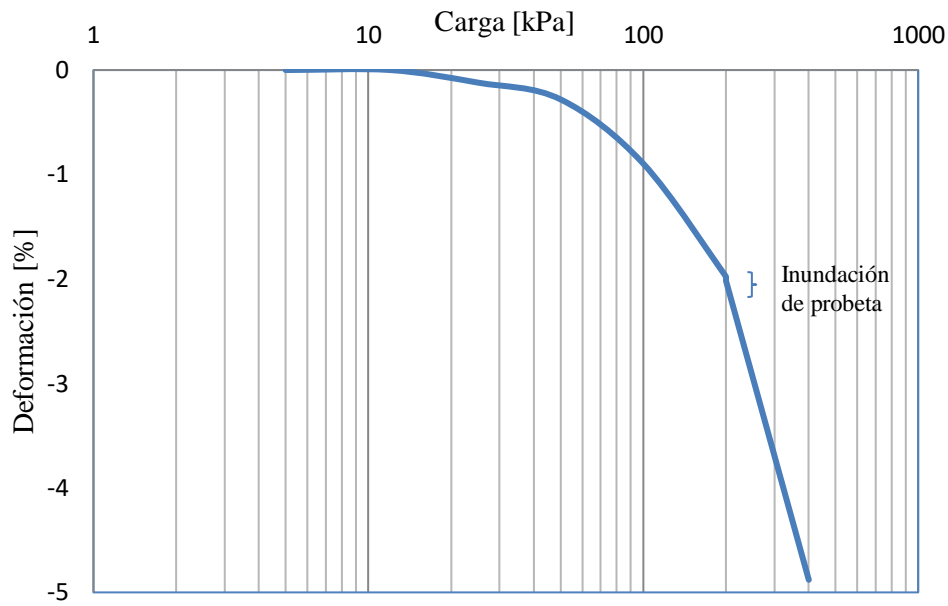
**Figura 10.** Curvas de penetración del ensayo CBR

En Figura 11 se puede observar que para la penetración de 2,54 mm al 95% de la DMCS el porcentaje de CBR es 1,4%, valor mayor que el porcentaje de CBR para la penetración de 5,08 mm, por lo que de acuerdo a la norma se toma el valor anterior (CBR de 1,4%). Este valor de porcentaje se asemeja al valor de un suelo como limo o arcilla.



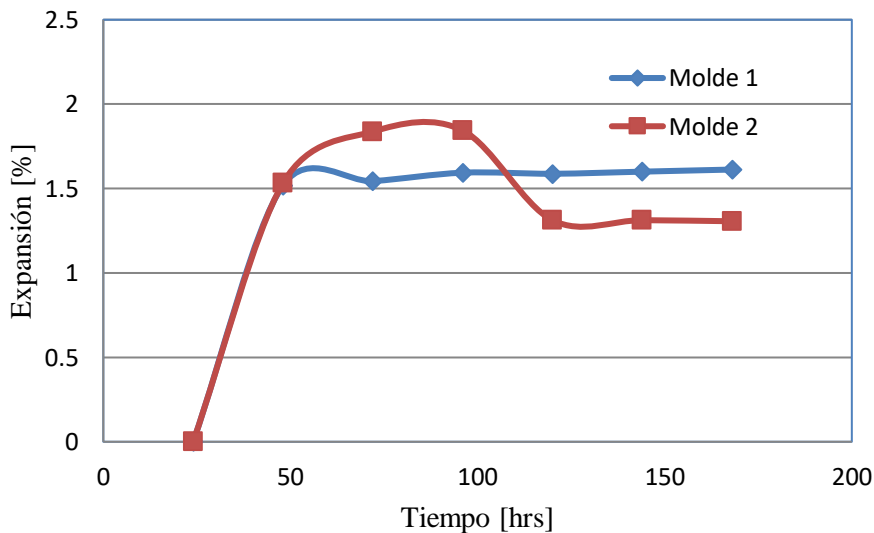
**Figura 11.** Resultados del ensayo CBR

Al momento de saturar la probeta después de cargarla con 200 kPa en el ensayo de colapso, la muestra presentó un bajo asentamiento (Figura 12), lo que permite decir que no se presentan propiedades colapsables (Índice de colapso  $I_c = 0,04\%$ ).



**Figura 12.** Resultados del ensayo de colapso

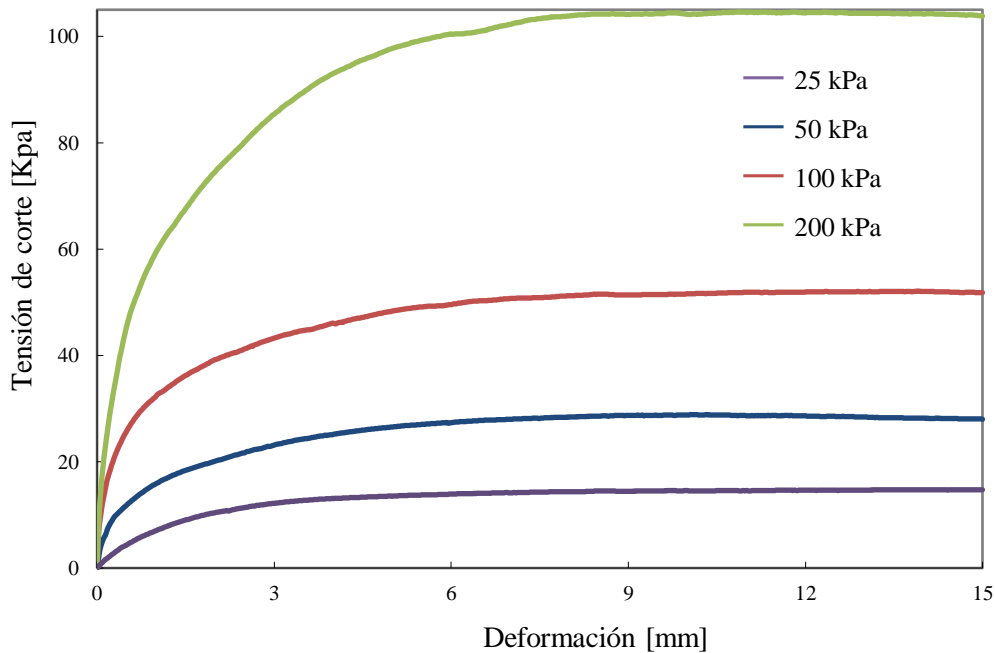
En el ensayo de potencial de expansión se pudo observar que la muestra hincha rápidamente al ser sumergida efecto de la temperatura que permite acelerar la hidratación de las partículas que componen las cenizas (Figura 13). En el caso del molde 1 con una densidad seca (antes de sumergir) de  $13,81\text{kN}/\text{m}^3$  y el molde 2 a una densidad de  $13,49\text{kN}/\text{m}^3$  las expansiones máximas fueron de 1,6% y 1,8%. Al comparar con el hinchamiento ocurrido en el ensayo de CBR con un promedio de 4,3% para las dos muestras compactadas a 56 golpes se puede notar que entre los efectos que producen estas diferencias son la temperatura y densidad. El ensayo de hinchamiento libre no entrega un resultado que se pueda correlacionar con los ensayos mencionados anteriormente (debido a las dimensiones de la probeta y la sobrecarga). La muestra al ser cargada con una carga de 5 kPa al pasar 72 horas de ensayo solo muestra un hinchamiento de 0,1%.



**Figura 13.** Resultados del ensayo de potencial de expansión

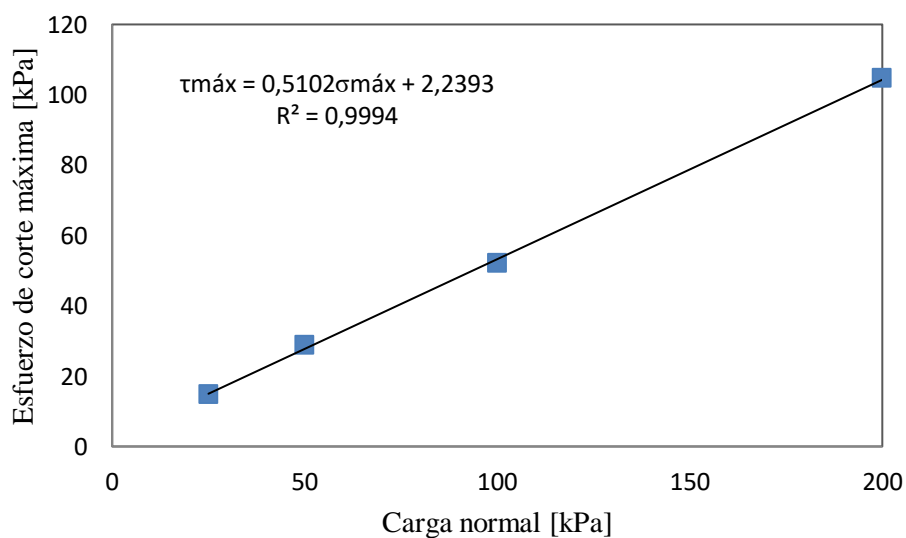
### 4.3 Propiedades resistentes

Se puede corroborar el comportamiento similar a un limo con la cohesión nula obtenida en el ensayo. Al tener la característica de un suelo blando, no se presenta un descenso después de llegar al esfuerzo de corte máximo y por ende, un ángulo de fricción residual (Figura 14).



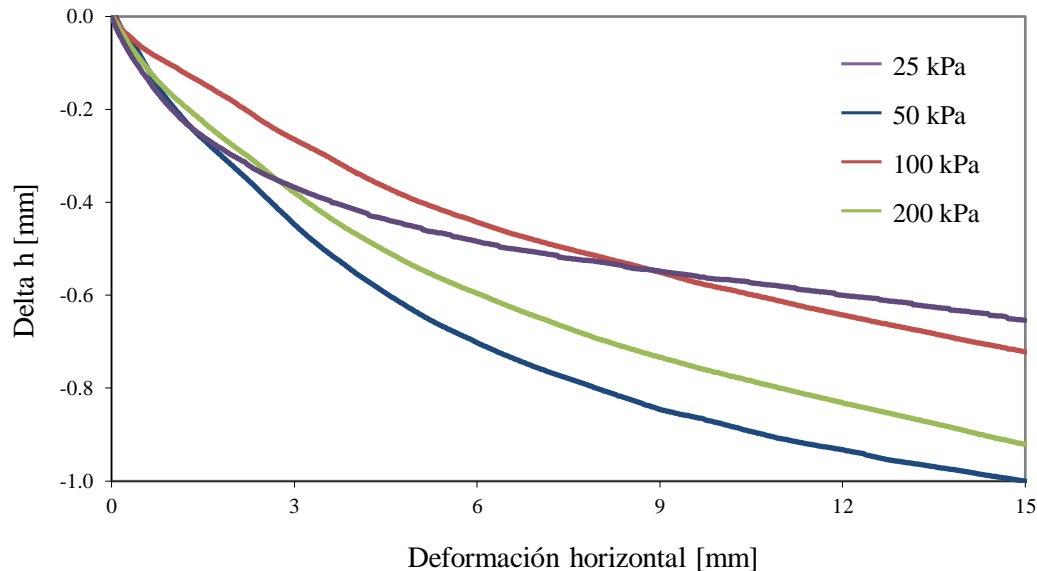
**Figura 14.** Gráfico de tensión de corte vs deformación horizontal

El ángulo de fricción interna es de  $28^\circ$  (Figura 15) encontrándose dentro del rango de ángulos de fricción interna de un limo lo cual es relativamente alto considerando que más del 90% de las partículas pasa a través del tamiz n°200.



**Figura 15.** Resultados del ensayo de corte directo

La muestra presenta un comportamiento contractivo a medida se realiza la etapa de corte (Figura 16) ya que no aumenta su volumen al estar sometido a diferentes cargas. Esto concuerda con lo sucedido en el ensayo de potencial de expansión donde la muestra al estar sometida a carga, después de ser compactada, consolida luego de tener un hinchamiento leve.



**Figura 16.** Gráfico delta h vs deformación horizontal

## 5. CONCLUSIÓN

Si bien hoy en día se reutiliza un gran porcentaje de cenizas volantes producidas en centrales termoeléctricas, sobretodo en industrias cementeras, la alta demanda de consumo energético creciente en el país hace que se requiera de más combustible o más centrales para su abastecimiento, lo que conlleva a la generación de más residuos. Por esto, considerando las toneladas producidas al día que no se reutilizan y el espacio requerido para su alojamiento, es necesario obtener más información de estos residuos para ser reutilizados en áreas que sean viables. Esto motivo a realizar una caracterización geotécnica de las cenizas volantes obtenidas del precipitador electrostático de una central termoeléctrica ubicada en la región del Biobío para estudiar potenciales usos en otras aplicaciones en la región.

Dentro de la caracterización geotécnica del material se logró obtener las características de su granulometría donde más del 90% pasó por la malla n°200, no obstante el ángulo de fricción es relativamente alto considerando esto. Sabiendo que se trata de una ceniza no activa de carácter puzolánico, y teniendo en cuenta que no tiene plasticidad, se considera un material óptimo para ser utilizado en forma de aglomerado así como sustitutivo parcial del cemento en hormigones, fabricación de ladrillos, mezcla de áridos y aditivos sustitutivos en la industria cerámica, además de tener un potencial uso en la estabilización de suelos expansivos y dado a su contenido en sílice y aluminio, es un material con potencial uso para la síntesis de zeolitas por medio de activación hidrotermal alcalina (adición de soluciones de hidróxidos). Por otro lado, debido al hinchamiento rápido (aunque leve) de las cenizas al ser sumergidas en agua, se recomienda determinar el límite elástico de la mezcla al ser sumergida antes de su utilización. El ensayo CBR indica que las cenizas tienen una baja capacidad de soporte (1,4% para una penetración de 2,54 mm) y sus densidades y gravedad específica son menores en comparación con suelos como arenas que presentan similitud en el ángulo de fricción interna y plasticidad.

El conocimiento de las necesidades de mercado y la relación simbiótica entre el investigador y el desarrollo de productos es de suma importancia para la creación de nuevos campos para el reciclaje de las cenizas volantes (Kruger, 1997). Desde este punto de vista, como líneas de investigación a futuro se recomienda realizar estudios químicos, mineralógicos y medioambientales de las cenizas volantes y como se ha mencionado anteriormente, analizar las cenizas en aglomerados.

## 6. REFERENCIAS

**Andrieux, P y Colombel, J.H.** (1976). "Utilisation des cendres volantes e technique routiere". Bull. Liaison. Labo. P. et Ch. 83, Mayo-Junio.

**Anon.** (1914). An investigation of the pozzolanic nature of coal ashes. Engineering News, 71 (24), 1334-1334

**Argiz, C., Menéndez, E., Moragues, A. y Sanjuán, M.A** (2015). Fly ash characteristics of Spain coal-fired power plants. *Afinidad LXXII*, 572. Pages 269-277. Madrid, España.

**ASTM C618** (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 D1557** (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 D1883** (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 D3080** (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 D421** (2007): "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM D422** (2002): "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM D4253** (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 D4254** (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 D4318** (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 D4792** (2001): "Standard Test Methods for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM D5550** (2001): "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

**ASTM D5333** (2003): "Standard Test Methods for Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standars.

- Barrera, R., Pérez, J., Salazar, C.** (2014). “Carbones Colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas”. *Rev.ion.* 2014: 27(2):43-54. Bucaramanga (Colombia).
- Becerra, J.** (2010). “Diseño de un precipitador electrotático”. Trabajo de graduación en el cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico. Universidad Santiago de Chile.
- Blanco, J.M. y Peña, F.** (2006). “Obtención del valor real de las pérdidas de difícil evaluación aplicables al Cálculo de rendimiento de calderas”, *Información Tecnológica*, 17, 3, 123-128, (2006).
- Carlson, R. W., Davis, R. R., Kelly, J. W. & Davis, H. E.** (1937). Properties of cements and concretes containing fly ash. *Journal of the American Concrete Institute*, 33, 577-611.
- Carrillo, F., Galindo, A., Jesús, M., et al.** (2012). Remoción de cobre y plata en solución empleando cenizas volantes, pruebas preliminares.
- Cheng, T.W. & Chen, Y.S.** (2004). “Characterization of glass ceramics made from incinerator fly ash”. *Ceram. Int.* 2004, 30, 343-349.
- CSA** (1998). “Cementitious Materials Compendium”, A300-98, Canadian Standards Association, Ontario, Canada.
- Decreto Supremo N°148.** (2003). “Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos”, División rectoría y regulación sanitaria departamento de salud ambiental. Gobierno de Chile, Ministerio de Salud.
- Fatih, T. & Umit, A.** (2001). “Utilization of Fly Ash in Manufacturing of Building Bricks”. *International Ash Utilization Symposium*, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #13.
- Fernandez, M.** (1986). “Los cementos con adición de cenizas volantes de centrales térmicas asturianas”. *Jornadas Tecnológicas sobre cenizas*. Colegio de Ingenieros de C.C. y P. Oviedo.
- Gamero, P., Medina, A., Querol X., et al.** (2010). “Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization”. *Journal of Hazardous Materials* 181 2010. 82–90.
- Goelen, E.H.G.** (1982). “De certaines caractéristiques des cendres volantes utilisées comme matériaux de remblai”. *Amici et Alummi Em. Prof. Dr. Ir. E.E. De Beer*, pp. 157-164.
- González, A., González, J., López, C., Navarro, E., Vadillo, L. & Vázquez, A.** (1995): “Waste re-use Manual from the mine, metallurgical and electrical industry”, Spanish Geological Institute, Madrid, 1995, 308pp. (In Spanish).
- Helmuth, R.** (1987). “Fly Ash in Cement and Concrete”. SP040, Portland Cement Association, Skokie, IL, 1987, 203 pages.
- Huang, C., Kuo, J.J., Lin, S.H. & Pan, J.R** (2008). “Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement”. *Waste Manag.* 2008, 28, 1113-1118
- ISO 11760** (2005). “Classification of coals”. International Organization for standardization.
- Khaja, M. & Chethan, K.** (2018). “Stabilization of Expansive Soil Using Wheat Husk Ash and Granulates Blast Furnace Slag”. *Trends in Civil Engineering and Material Science* 1(2).
- Kruger, R.** (1997). “Fly Ash beneficiation in South Africa: creating new opportunities in the market-place”. *Fuel* 76.

- Leonards, G.A. y Bailey, B.** (1982). "Pulverized Coal Ash as Structural fill". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol. 108, No. GT4. Abril.
- Luxan, M., Sanchez, M. y Soria, F.** (1988). "Características de cenizas volantes españolas". Serrano Galvache, s/n. 28033 Madrid/España. Materiales de construcción. Vol 38, n°209
- NCh 2754** (2003). "Procedimiento de lixiviación para determinar movilidad de anualitos tóxicos orgánicos e inorgánicos". Instituto Nacional de Normalización INN, Chile.
- Pardo, F.** (1993). "Comportamiento geotécnico de cenizas volantes en rellenos compactados y su evolución a lo largo del tiempo". Tesis doctoral Universidad Politécnica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., López-Soler, A.** (1997). "Synthesis of Na-zeolites from fly ash". Fuel, 76. 793-799.
- Raymond, S.** (1961). "Pulverized Fuel Ash as Embankment Material". Proc. I.C.E., V.19. Londres.
- Sear, L.K.A.** (2001). "The Properties and Use of Coal Fly Ash", Thomas Telford, London. 261 pages.
- Thomas, M., Jewell, R. y Jones, M.** (2017). "Coal Fly Ash as a Pozzolan". In T. Robl, A. Oberlink, & R. Jones (Eds.), Coal Combustion Products (CCP's): Characteristics, Utilization and Beneficiation (1 ed., pp. 121-154). Woodhead Publishing Limited.
- USBR.** (1948). "Physical and chemical properties of fly ash-Hungry Horse Dam". Laboratory Report CH-95. US Bureau of Reclamation