

ESTUDIO PARA LA UTILIZACION DE CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALDERA COGENERADORA PETROPOWER EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS

GUILLERMO THENOUX Z., Ingeniero Civil, MSc, PhD, Profesor Titular

Depto. Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile
gthenoux@ing.puc.cl

HECTOR CARRILLO O., Ingeniero Civil, Investigador Asociado

CIIV Centro de Ingeniería e Investigación Vial - DICTUC S.A., Pontificia Universidad Católica de Chile, hcarrill@ing.puc.cl

RESUMEN

Este trabajo presenta el estado actual de una investigación en desarrollo, cuyo objetivo es estudiar la factibilidad de utilizar cenizas FBC (combustión de lecho fluido) provenientes de la planta cogeneradora Petropower (Petrox, Talcahuano) en la estabilización de suelos para la construcción de caminos.

Las cenizas FBC se diferencian de las cenizas volantes tradicionales, principalmente en su contenido de cal, lo que las hace útiles para mejorar suelos finos arcillosos. Los resultados obtenidos indican que la adición de ceniza FBC volante, puede aumentar en 2 o 3 veces la resistencia a la compresión no confinada del suelo, y mejorar su estabilidad bajo agua. Se cree que un campo importante de aplicación de la ceniza FBC son los caminos forestales.

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La empresa energética Petropower posee y opera una caldera de cogeneración de lecho fluido (FBC, *Fluidized Bed Combustion*), ubicada en Talcahuano (VIII Región), que opera con coque de petróleo. Como resultado de la operación de esta caldera, se produce una cantidad importante de cenizas, denominadas cenizas FBC, las que son hidratadas y depositadas en un relleno ubicado al interior de la planta de la refinería Petrox, propietaria de las cenizas.

La combustión de lecho fluido (FBC) es una tecnología que permite utilizar carbón con alto contenido de azufre (como es el caso del coque de petróleo) en la generación de energía eléctrica, reduciendo la emisión de SO_x al medio ambiente. Las principales diferencias entre la tecnología FBC y los sistemas tradicionales son: (1) menores temperaturas de operación y (2) la incorporación de un material para la desulfurización de los gases de combustión (en el caso de Petropower se incorpora caliza). Debido a estas diferencias, las cenizas FBC son muy diferentes de las cenizas tradicionales. Mientras éstas últimas están compuestas principalmente por sílice

(SiO₂) y alúmina (Al₂O₃), las cenizas FBC son ricas en cal y sulfatos, y tienen un bajo contenido de compuestos puzolánicos (sílice y alúmina).

Por otra parte, en muchos sectores del sur de Chile los suelos son principalmente limosos o arcillosos, y en general es difícil encontrar buenos materiales de subrasante o de bases para caminos. Sin embargo, estos tipos de suelo pueden ser estabilizados químicamente con diversos tipos de agentes cementantes, como cal, cemento, cenizas volantes y otros.

Dado que las cenizas FBC contienen una proporción importante de cal, el cual es un efectivo estabilizador de suelos finos, se propuso la realización del presente estudio para evaluar la factibilidad técnica y económica de utilizar las cenizas FBC en la estabilización de suelos finos de la VIII Región.

1.2 Alcances y objetivos

Los objetivos de esta investigación fueron:

- Caracterizar las cenizas FBC producidas en la caldera cogeneradora Petropower.
- Evaluar los efectos de la adición de cenizas FBC en suelos finos del sur de Chile.
- Desarrollar un procedimiento de dosificación para mezclas suelo-ceniza FBC.
- Determinar la factibilidad técnica de estabilizar suelos finos con cenizas FBC.

Para cumplir estos objetivos, la investigación fue dividida en 2 etapas: Etapa I de estudio en laboratorio, y Etapa II de pruebas a escala real. El presente trabajo resume el estudio realizado en la Etapa I de laboratorio, que consistió principalmente en pruebas de comportamiento utilizando muestras de suelo de la VIII y IX Región.

2. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO

Existe una limitada cantidad de información, a nivel mundial, acerca de la utilización de cenizas FBC en la estabilización de suelos, de modo que la investigación bibliográfica incluyó también la revisión de material sobre estabilización de suelos con cal y cenizas volantes tradicionales.

2.1 Estabilización de suelos con cal

La cal se utiliza ampliamente para estabilizar suelos finos, los cuales son ricos en sílice y alúmina (compuestos puzolánicos).

Cuando la cal se adiciona al suelo fino y se suministra agua, el medio acuoso permite la llegada de la cal a las partículas de arcilla, donde se produce un intercambio catiónico, que consiste en que iones sílice y alúmina son reemplazados por iones de calcio. Esto produce una disminución de la doble capa de la partícula de arcilla, y la floculación y aglomeración de las partículas. Como resultado de esto, se modifica la textura del suelo, se modifica su plasticidad y se producen partículas de mayor tamaño (TRB, 1987).

A su vez, la cal se transforma en hidróxido de calcio y reacciona con la sílice y alúmina (reacción puzolánica) para formar compuestos cementantes, como silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH). La reacción puzolánica se produce en el mediano y largo plazo, mientras hayan compuestos disponibles, lo que implica que la resistencia del suelo estabilizado aumenta con el tiempo (Little, 1999).

2.2 Estabilización de suelos con cenizas volantes tradicionales

Las cenizas volantes tradicionales se caracterizan por su bajo contenido de cal y alto contenido de sílice, por lo que su utilización como estabilizador de suelos requiere la adición de un agente activador rico en cal. El agente activador provee la cal necesaria para que se produzca la reacción puzolánica, mientras que la ceniza provee los compuestos puzolánicos, sílice y alúmina (Misra, 2000). Es así como las mezclas cal - ceniza volante pueden ser usadas para estabilizar suelos gruesos o suelos finos no arcillosos. Normalmente se utiliza cal o cemento como agente activador.

2.3 Utilización de cenizas FBC

Dado que la ceniza FBC contiene un porcentaje importante de cal, es posible utilizarla para estabilizar suelos finos. Sin embargo el uso de la ceniza FBC también produce otras reacciones, como la formación de yeso y etringita, compuesto que se forma a partir de los sulfatos presentes en la ceniza, y que también aporta a la resistencia mecánica (Tishmack, 1999).

La formación de etringita, que en realidad es uno de los minerales de la familia *Etringita*, es nociva para la durabilidad de la estabilización, ya que tiene un volumen aproximado de 2,5 veces el volumen de los compuestos que la forman; es decir, es una reacción expansiva que puede producir deformaciones por expansión o reducciones en la resistencia del suelo estabilizado (The National Lime Association, 2000).

Estudios realizados en la Universidad Purdue en West Lafayette, indican que la estabilización de capas de rodado con ceniza FBC no tiene una buena durabilidad debido justamente a la formación de la etringita. Esto por el efecto expansivo de este compuesto y porque además, la etringita con el paso del tiempo, se degrada y se transforma en otros compuestos secundarios, perdiendo su resistencia. Se ha informado que capas granulares de rodado, estabilizadas con ceniza FBC, se tornan polvorizas alrededor de dos años después de construido. Sin embargo, se ha informado el uso de ceniza FBC producida a partir de coque de petróleo, en la estabilización de suelos de subrasante, con resultados positivos (Conn, 1999).

La ceniza FBC se ha utilizado, además, para construir rellenos estructurales, donde se han estudiado las expansiones y el desarrollo de resistencia del material aplicado en forma individual (Deschamp, 1998).

3. CARACTERIZACION DE CENIZAS FBC

3.1 Tipos de ceniza FBC

Se pueden identificar dos tipos principales de ceniza FBC: ceniza de fondo o BA (*bottom ash*) y ceniza volante o FA (*fly ash*). La ceniza de fondo precipita al fondo de la caldera donde es extraída por gravedad, y luego transportada hasta un silo de almacenamiento. Por otra parte, la ceniza volante es expulsada junto con los gases de combustión, para ser atrapada en los filtros del sistema de recolección (*baghouse*), desde donde se transporta al silo de almacenamiento. En dicho silo se mezclan ambos tipos de ceniza (ceniza compuesta o FBA) y se hidratan, para posteriormente ser transportadas hasta un acopio o relleno ubicado al interior de la planta (ceniza compuesta hidratada o FBA.h). La Figura 1 muestra un esquema del proceso de obtención de las cenizas FBC.

De acuerdo al proceso de producción, se pueden obtener cuatro tipos de cenizas FBC:

- FA.d (ceniza volante seca). Se obtiene de los sistemas de recolección de polvo de la caldera.
- BA.d (ceniza de fondo seca). Esta ceniza precipita al fondo de la caldera. Este tipo de ceniza está formada por partículas visibles de color café, negro y blanco.
- FBA.d (ceniza compuesta seca). Esta mezcla se produce en el silo de almacenamiento.
- FBA.h (ceniza compuesta hidratada). Mezcla de cenizas hidratada depositada en el acopio.

3.2 Ensayos de caracterización de cenizas FBC

Con el fin de caracterizar las cenizas FBC se realizaron los siguientes ensayos:

- **Análisis Químico.** Este ensayo se realizó para identificar óxidos mayores. La Tabla 1 muestra un resumen con los resultados obtenidos en la ceniza volante (FA.d) y de fondo (BA.d).
- **Análisis de Cal Libre.** Para determinar el contenido de cal disponible en la ceniza. Los resultados se incluyen en la Tabla 1.
- **Análisis por Difractometría de Rayos X (XRD).** Este ensayo se realizó para determinar la mineralogía de las cenizas. En el caso de la ceniza BA.d (de fondo), el ensayo se realizó en forma separada para los tres tipos de partículas componentes (fracción café, negra y blanca).
- **Densidad.** La Tabla 2 resume los resultados obtenidos.
- **Granulometría.** Se realizó para determinar la distribución de tamaños y, en forma indirecta, la finura de la ceniza. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos.

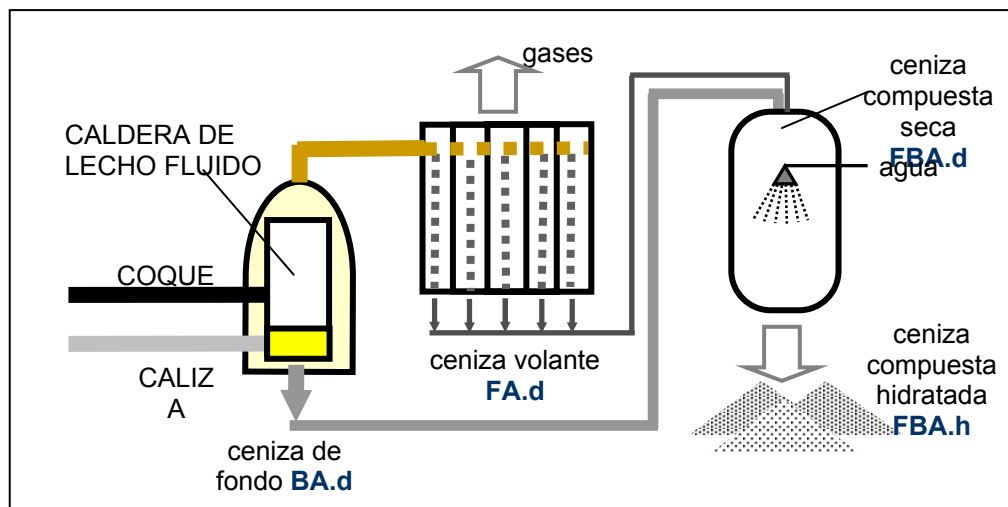


Figura 1. Esquema del proceso de obtención de cenizas FBC.

TABLA 1. Resumen de resultados de análisis químico de cenizas FBC.

Compuesto	% en peso	
	FA.d	BA.d
SiO ₂	1,75	12,40
Al ₂ O ₃	0,30	0,38
CaO	43,98	47,31
C	10,63	0,15
SO ₃	36,36	35,41
Cal Libre	14,23	21,12

TABLA 2. Resultados de medición de densidad de cenizas FBC.

Tipo Ceniza	Peso Específico Sólidos (kg/dm ³)	Densidad Aparente (kg/dm ³)
Volante (FA.d)	2.26	0.68
De Fondo (BA.d)	3.25	1.59
Compuesta hidratada ⁽¹⁾	-	0,4 - 0,7

(1) Densidad máxima compactada seca: 1,46 kg/dm³.

TABLA 3. Resultados análisis granulométrico de cenizas FBC.

Tamiz (mm)	Porcentaje que pasa			
	FA.d	BA.d	FBA.d	FBA.h
3	100	100	100	100
2	100	99,3	99,7	99,6
1	100	94,1	97,6	97,1
0,5	100	71,8	88,7	78,6
0,25	100	34,3	73,7	61,3
0,125	99,7	3,3	61,2	45,3
0,063	80,1	0,0	48,1	32,4

3.3 Análisis de resultados de caracterización

Los ensayos químicos realizados muestran que la ceniza FA.d corresponde principalmente a anhídrita (CaSO_4) y cal (CaO), con un contenido de cal libre del 16 %. Las partículas de la ceniza BA.d están compuestas por cuarzo (partículas café), hematita (partículas negras) y anhídrita y cal (partículas blancas), con un contenido de cal libre de 60 % para las partículas blancas, y 21 % para la ceniza total.

Con respecto a los análisis físicos, las granulometrías realizadas indican que la ceniza volante es un polvo muy fino, cuyas partículas no superan los 0,13 mm de diámetro. La ceniza de fondo presenta una distribución de tamaños bastante continua, con partículas que van desde los 0,13 a 1 mm. Esta ceniza no contiene finos menores a 0,13 mm. De acuerdo a estos resultados, la ceniza de mayor potencialidad para estabilizar suelos corresponde a la ceniza volante, ya que su tamaño le permitiría reaccionar en el medio acuoso, a diferencia de la ceniza de fondo, que de acuerdo al estudio bibliográfico realizado, no debería reaccionar mayormente a pesar del contenido de cal de las partículas blancas.

Por otra parte, los valores de peso específico de sólidos son altos comparados con las densidades aparentes, lo cual es una muestra de la estructura interna de las cenizas, especialmente la ceniza FA.d. Los resultados obtenidos indican que el volumen de aire en la ceniza FA.d es de un 70 % y de un 50% en el caso de la ceniza BA.d, considerando huecos entre partículas y huecos dentro de las partículas. Con respecto a la ceniza FA.h, su densidad aparente depende de la compacidad de la muestra. Se midieron densidades entre 0,37 y 0,63 kg/dm^3 , mientras que la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor, corresponde a 1,46 kg/dm^3 .

4. PROGRAMA DE LABORATORIO Y RESULTADOS OBTENIDOS

El programa de laboratorio realizado se dividió en tres etapas:

- **Caracterización de suelos.** Se utilizaron dos muestras de suelo en la investigación, las que fueron caracterizadas previo a iniciar el estudio sobre estabilización.

- **Ensayos preliminares.** Destinados a determinar las reacciones de estabilización que se producen en el suelo producto de la adición de cenizas FBC.
- **Ensayos de desempeño.** Estos ensayos se realizaron para determinar el efecto de la adición de ceniza FBC en las propiedades de desempeño del suelo.

4.1 Caracterización de suelos utilizados en la investigación

Los suelos utilizados en la investigación corresponden a muestras tomadas en la VIII Región (Camino de La Madera) y IX Región (Faja Maisan). Se realizaron ensayos de caracterización, de los cuales se presenta un resumen en la Tabla 4.

TABLA 4. Resumen de resultados, ensayos de caracterización de suelos.

Propiedad	Muestra de Suelo	
	VIII Región	IX Región
Granulometría		
Tamaño máximo nominal, mm	25	4,75
Material bajo malla # 40, %	45	64
Material bajo malla #200, %	29	37
Límites de Atterberg		
Límite Líquido, %	32	41
Índice de Plasticidad, %	9	10

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- **Suelo VIII Región.** Es un suelo relativamente graduado, con partículas de hasta 25 mm, y con un importante contenido de finos de relativa plasticidad. Visualmente no resulta muy plástico y tiene un aspecto arenoso limoso. De acuerdo a los resultados de laboratorio, este suelo clasifica como SC-G (arena arcillosa con grava) según el sistema USCS, y como A-2-4 según el sistema de clasificación AASHTO.
- **Suelo IX Región.** Es un suelo fino con alto contenido de finos plásticos. Visualmente, tiene un aspecto más arcilloso, parece ser bastante plástico y al secarse adquiere una considerable dureza. De acuerdo a los resultados de laboratorio, este suelo clasifica como SM (arena limosa) según el sistema USCS, y como A-5 según el sistema de clasificación AASHTO.

En el resumen de resultados, se presenta también el material que pasa la malla #40, ya que las dosis de ceniza FBC han sido expresadas como porcentaje en peso respecto al material que pasa dicha malla.

4.2 Ensayos preliminares

(a) Estudio de Formación de Compuestos Cementantes

El objetivo de este estudio fue determinar los mecanismos de estabilización y los productos secundarios formados. Entre los productos secundarios, se estudió la formación de etringita, la cual se forma a partir de las reacciones entre sulfatos, cal y alúmina. Los ensayos realizados corresponden a:

- **Eades and Grimm o Dosis Inicial de Ceniza FBC.** Mide la mínima dosis que eleva el pH del suelo (en un medio acuoso) a 12,4, y que se define como la dosis inicial de ceniza FBC. El nivel de pH indicado es el mínimo que se requiere para que se produzca la reacción puzolánica. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos.
- **Contenido de Etringita.** Este es un ensayo para medir la formación de etringita (Tischmack, 2000), el cual se basa en sus propiedades físicas. La etringita está formada en un 50 % por agua (en peso), la que es liberada a temperaturas superiores a los 60 °C. El ensayo consiste en secar una muestra de suelo estabilizado a 55 °C y luego a 110 °C. La diferencia de masa corresponde al agua química presente en la etringita, por lo tanto se puede determinar teóricamente la cantidad presente. En realidad, la cuantificación de la etringita por este medio no es en un 100 % exacta, puesto que el yeso hidratado tiene propiedades similares y por lo tanto también es contabilizado como etringita. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Los resultados obtenidos indican que para el suelo de la VIII Región, una dosis de ceniza FA.d del 5 % ya produce un ambiente con pH superior a 12,4, mientras que se requiere una dosis de 12 % de ceniza BA.d para producir el mismo efecto. Para el caso del suelo de la IX Región, es imposible alcanzar el nivel de pH deseado, con ambos tipos de ceniza.

Las mediciones de etringita indican que, en general, la cantidad de etringita formada no aumenta considerablemente al aumentar la dosis de ceniza utilizada. Se puede ver que para el suelo de la VIII Región, la cantidad de etringita formada es de alrededor del 1 %, mientras que para el suelo de la IX Región es de alrededor de un 3 % (3,1 % para ceniza FA.d y 3,3 % para ceniza BA.d). Estos resultados indicarían que las cenizas presentan una mayor reactividad con el suelo de la IX Región, lo que aparentemente se contrapone con los resultados del ensayo Eades and Grimm. La causa más probable de esto puede estar relacionada con la mineralogía de la arcilla, ya que para que se forme etringita debe haber alúmina presente en el suelo.

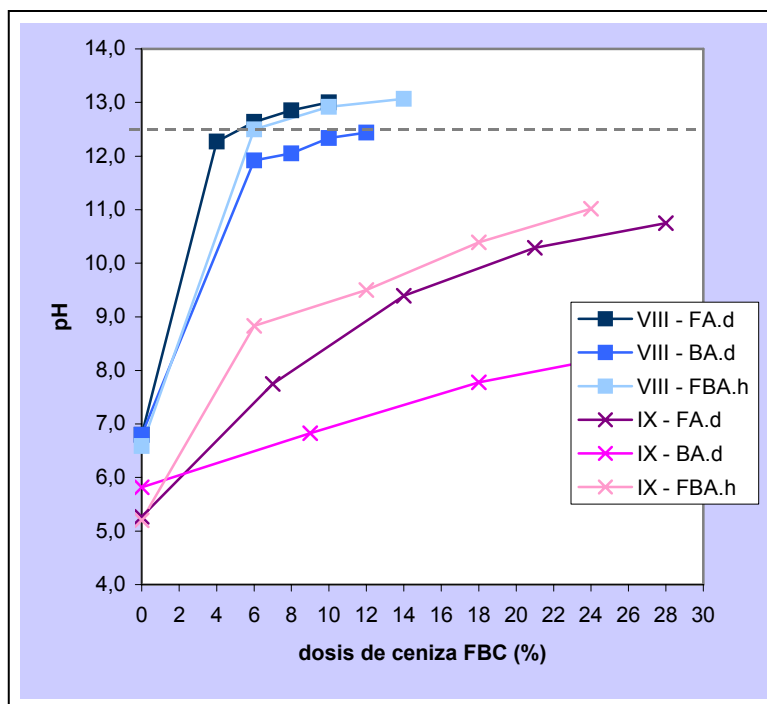


FIGURA 2. Ensayo de Eades and Grimm.

TABLA 5. Resultados medición de etringita.

suelo	VIII Región				IX región			
	FA.d		BA.d		FA.d		BA.d	
ceniza	6	20	6	20	6	20	6	20
dosis ceniza	1,04	1,25	1,04	1,08	3,02	3,08	3,30	3,33

(b) *Estudio de Expansión de Suelos Estabilizados con Cenizas FBC*

Debido a la formación de etringita, producto de la presencia de sulfatos en la ceniza FBC, existe la posibilidad que ocurran expansiones en las mezclas suelo - ceniza FBC. Se ha reportado que la expansión producida por la etringita puede generar presiones importantes y reducir la resistencia del suelo estabilizado (The National Lime Association, 2000; Tischmack, 2000). Para evaluar en forma relativa la expansión que se produce en mezclas suelo - ceniza FBC, se realizaron ensayos de hinchamiento libre en consolidómetro. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.

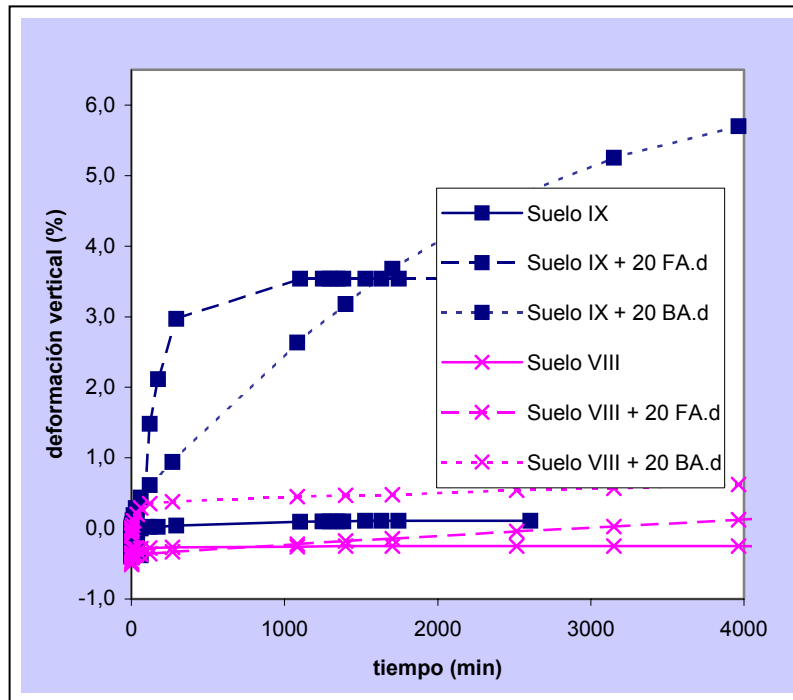


FIGURA 3. Resultados ensayo de hinchamiento libre en consolidómetro.

Los resultados indican que el efecto expansivo de la ceniza BA.d (de fondo) es mucho mayor que el de la ceniza FA.d (volante). En el caso del suelo de la VIII Región, que en su estado natural no es expansivo, la adición de ambas cenizas produce una muy baja expansividad (menos de un 1 %). Para el caso del suelo de la IX Región (de muy baja expansividad), la adición de las cenizas FBC produce una alta expansión, del 3 % cuando se adiciona ceniza FA.d y del 6 % cuando se adiciona ceniza BA.d. El tiempo durante el cual se produce la expansión es muy variable, pudiendo ser de algunos minutos hasta 4 días.

Las diferencias observadas entre los dos tipos de suelo, concuerdan con las mediciones de etringita realizadas, donde se observa un mayor contenido en las mezclas con suelo de la IX Región.

4.3 Ensayos de desempeño de suelos estabilizados con cenizas FBC

El principal parámetro de desempeño considerado en este estudio es la resistencia a la compresión no confinada (UCS). Muchos métodos de dosificación de suelos estabilizados con compuestos cementantes se basan en esta propiedad (AASHTO, 1990; Terrel, 1979; ICI, 1986; TRB, 1987; CSRA, 1986). Además, se estudió cómo la adición de ceniza afecta otras propiedades del suelo, principalmente su susceptibilidad al agua. Para determinar este efecto se realizó el ensayo de Estabilidad Bajo Agua (EBA).

(a) *Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS)*

El ensayo UCS se realizó para evaluar la resistencia mecánica del suelo estabilizado con ceniza FBC, utilizando probetas preparadas en moldes cilíndricos de 48 mm de diámetro y 94 mm de alto. Las probetas fueron curadas en una cámara ambiental que se mantuvo a 50 °C y 30 % de humedad, durante 3 días. Después de este período, las probetas fueron ensayadas a la compresión. La Figura 4 muestra la configuración del ensayo y el tipo de falla de una probeta de suelo estabilizado con ceniza FBC, el que corresponde al patrón de rotura típico de materiales cementados (falla frágil).



FIGURA 4. Configuración del ensayo UCS y forma de falla típica.

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados de los ensayos de compresión no confinada para los suelos de la VIII y IX Región. Es importante notar que en el caso de la mezcla del suelo IX Región estabilizado con un 20 % de ceniza FA.d, se sobrepasó el límite de carga de la prensa, por lo que no se alcanzó la falla de dos de las tres probetas y por lo tanto la resistencia es aún mayor.

En el caso del suelo de la VIII Región, la resistencia a la compresión no confinada aumentó en promedio 3 veces con un 10 % de ceniza FA.d, manteniendo el nivel de deformación de falla.

En el caso del suelo de la IX Región, los resultados indican que este suelo puede ser efectivamente estabilizado con un 20 % de ceniza FA.d, dosis para la cual se duplica la resistencia mecánica, sin aumentar significativamente la deformación de falla. No se observa un efecto importante al utilizar ceniza FBA.d en este suelo (por esta razón no se utilizó esta ceniza con el suelo de la VIII Región).

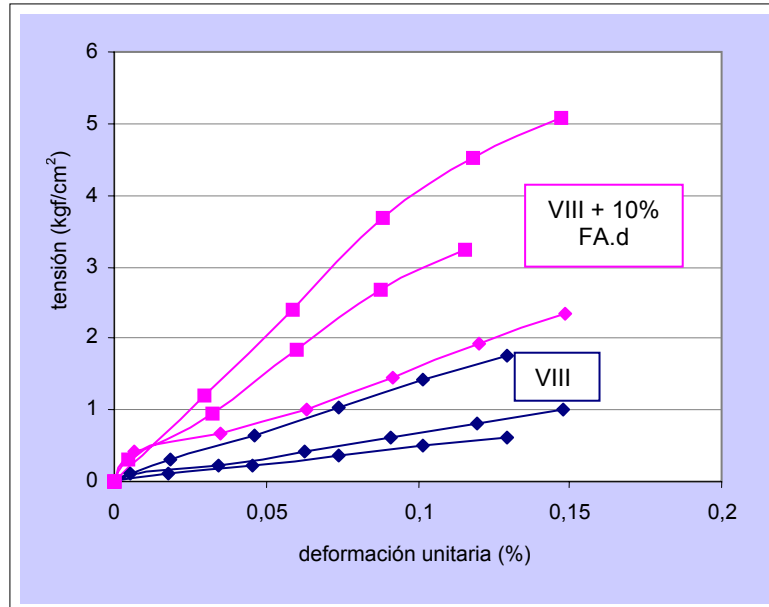


FIGURA 5. Resultados Ensayo de Compresión No Confinada, Suelo VIII Región.

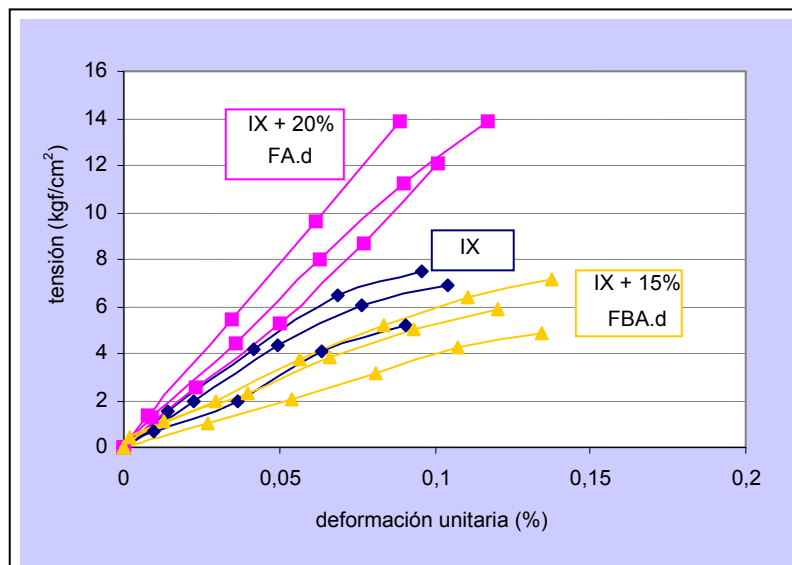


FIGURA 6. Resultados Ensayo de Compresión No Confinada, Suelo IX Región.

(b) *Ensayo de Susceptibilidad a la Humedad*

Dado que no existe un ensayo universalmente aceptado para medir la susceptibilidad de un suelo a la humedad, para evaluar esta propiedad se utilizó un procedimiento que se denominó Estabilidad Bajo Agua (EBA), y que consiste en fabricar probetas con distintos contenidos de ceniza FBC y sumergirlas parcialmente en agua. Como resultado de esta inmersión parcial, se

puede observar el efecto de la capilaridad y el deterioro progresivo de la probeta (disgregación). Este ensayo no es cuantitativo, pero es posible obtener un resultado cualitativo y comparativo del comportamiento de diferentes tipos de suelo y con diferentes contenidos de ceniza. Para documentar el resultado del ensayo se toman fotografías a distintos intervalos de tiempo y se obtiene una apreciación visual del comportamiento de las probetas.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los resultados del ensayo con probetas preparadas con suelo de la VIII Región y ceniza FA.d. Es posible apreciar que el suelo sin ceniza (0 %) se disgrega tan rápidamente que la probeta cae en el recipiente de ensayo después de un minuto de estar en contacto con el agua. Las demás probetas sufren un deterioro apreciable recién pasadas 2 horas, y como se puede ver en la Figura 9, a las 21 horas de estar sometidas al agua, todavía se encuentran estables, a pesar del deterioro evidente que presentan. La probeta que mostró el mejor comportamiento fue la correspondiente a una dosis de ceniza FA.d del 15 %.

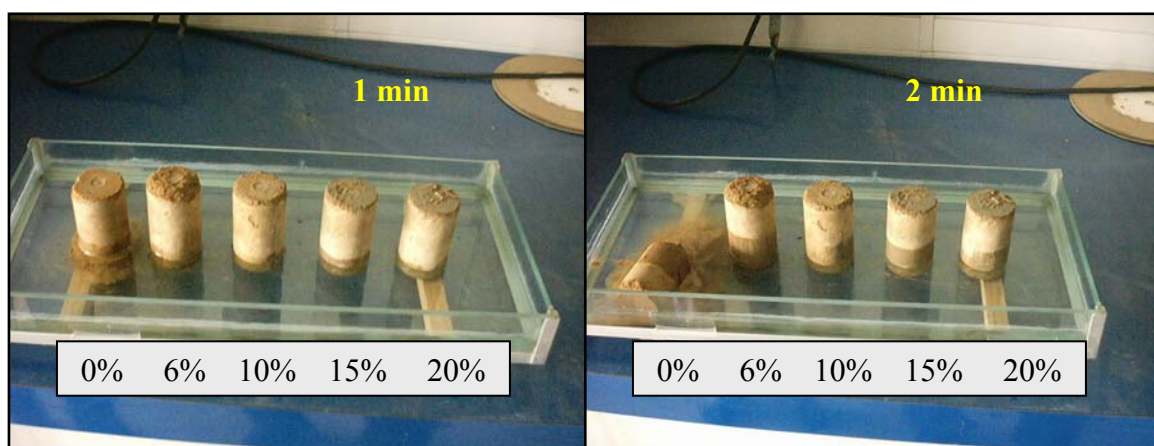


FIGURA 7 Y 8. Ensayo EBA, suelo VIII Región.

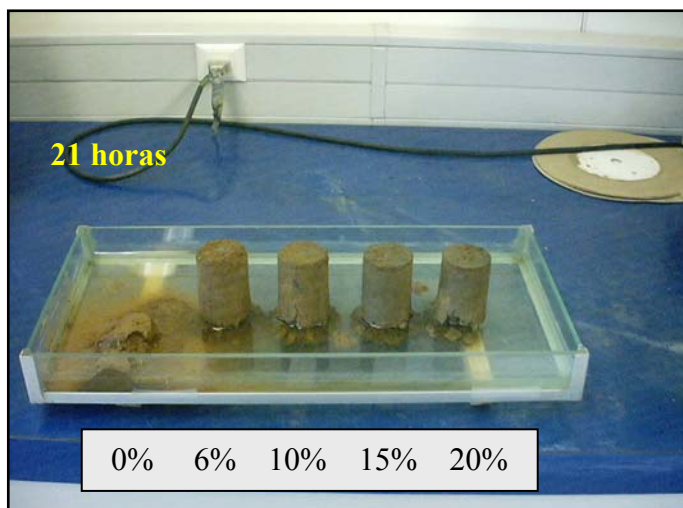


FIGURA 9. Ensayo EBA, suelo VIII Región.

La Figura 10 muestra el resultado obtenido en el ensayo del suelo de la IX Región con ceniza FA.d. En este caso, el deterioro de todas las probetas es similar, registrándose una menor disgregación en las probetas con ceniza, especialmente la probeta con un 15 % de ceniza.

La diferencia en el comportamiento de ambos tipos de suelo se debe a que el suelo de la IX Región es más plástico, por lo tanto es más impermeable, de modo que no hay gran diferencia entre la probeta sin ceniza y las probetas estabilizadas. Por otro lado, el suelo de la VIII Región es más bien limoso, de textura gruesa y menos plástico, es por ello que el agua penetra rápidamente en el interior de la probeta sin ceniza y el suelo pierde su cohesión, desmoronándose. En este suelo se aprecia más claramente el efecto positivo de la ceniza FBC.

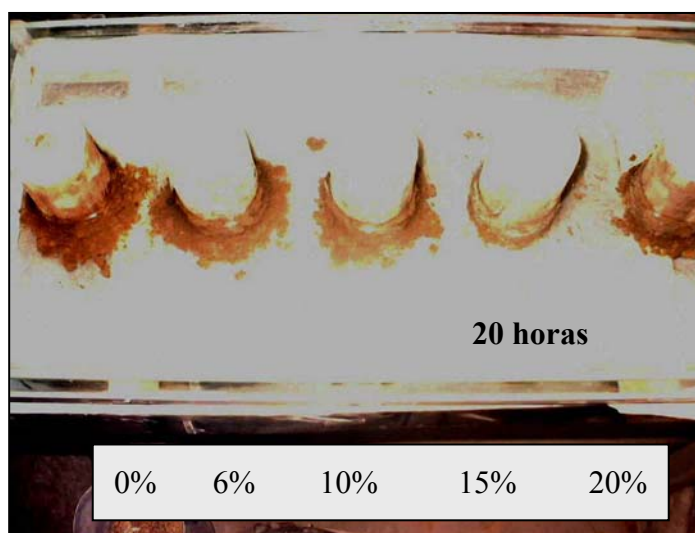


FIGURA 10. Ensayo EBA, suelo IX Región.

5. ASPECTOS AMBIENTALES Y Y POSIBLES APLICACIONES

De acuerdo al proyecto de "Reglamento sobre Manejo Sanitario de Materiales Peligrosos" del Ministerio de Salud, actualmente en trámite de promulgación, las cenizas de PETROPOWER son consideradas un residuo peligroso por su contenido de níquel (3300 ppm). PETROX S.A. como propietaria de las cenizas FBC, tiene gran interés en que los usos que puedan darse a las mismas cuenten con todas las autorizaciones ambientales y sanitarias pertinentes. Por ello se están efectuando estudios que tiendan a demostrar que los usos proyectados son inocuos y se ha denegado entregar el material a distintos interesados hasta completar estos estudios.

Una alternativa, y considerando que los Test de Peligrosidad EPA muestran que el material no es corrosivo, reactivo, ni lixivia ningún elemento en concentraciones fuera de norma, es mezclarlo en origen de modo de bajar la concentración resultante de metales, siguiendo el ejemplo de algunos Estados de USA en que esta práctica está autorizada. Es decir, para estabilizar un suelo se requeriría llevarlo a la planta de Petrox, mezclarlo con la ceniza FBC en una planta especial, y posteriormente llevarlo al camino.

Otro problema que presenta la ceniza FBC, es la expansión que se produce y el eventual envejecimiento de la mezcla suelo - ceniza FBC, informado en investigaciones de la Universidad Purdue. Sin embargo, se considera que este material se puede utilizar con efectividad para estabilizar suelos de caminos de explotación forestal. En la VIII Región existe un gran volumen de este tipo de caminos, y de acuerdo a información obtenida en empresas forestales, estos se construyen sobre el suelo natural, constituido por limos arenosos de muy mala calidad, colocando capas granulares de alrededor de 20 cm como carpeta de rodado. La política de gestión de los caminos forestales, que se diferencia de caminos de tierra típicos, se basa en los siguientes criterios:

- Costo: Se construye la estructura que tenga el mínimo costo.
- Duración: La estructura debe durar un año (período productivo).
- Valor residual: Al término del período de explotación, el valor residual debe tender a cero.

De acuerdo a estos criterios, se considera que es posible aplicar la ceniza FBC para estabilizar suelos limosos en caminos forestales de la VIII Región, con el objeto de disminuir los espesores de material granular que deben ser transportados y colocados, manteniendo una durabilidad de un año. Esto permitiría aplicar la ceniza FBC, a pesar de posibles problemas de durabilidad de la estabilización.

Si se considera además la cercanía de la fuente de obtención de las cenizas a los caminos forestales de la VIII Región, se concluye que además el costo de aplicación puede ser inferior a otras alternativas de estabilización, lo que hace a la ceniza FBC muy competitiva.

Por último, se están investigando también otras alternativas de utilización, como por ejemplo el uso de la ceniza como relleno para mezclas asfálticas nuevas o recicladas.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación permiten concluir que es posible utilizar la ceniza FBC para estabilizar suelos finos plásticos. Se considera que su uso puede mejorar el comportamiento de capas de suelo, en particular del suelo de subrasante en caminos de ripio (como es el caso de caminos forestales de la VIII Región).

El uso de ceniza FBC volante permitiría incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar el desempeño de las diferentes capas estructurales que componen un camino de ripio. Además, permite mejorar la susceptibilidad a la humedad de los suelos, especialmente con suelos finos de menor plasticidad o menor contenido de arcilla.

En el caso de los suelos de la VIII Región, la resistencia del suelo natural es de alrededor de 1 kg/cm², por lo que se trata de un suelo de mala calidad estructural. La adición de ceniza FBC puede triplicar su resistencia mecánica, lo que no necesariamente implica un mejoramiento importante de las propiedades del suelo, sin embargo, si se suma el efecto de una menor susceptibilidad al agua, se puede obtener en conjunto una mayor durabilidad del suelo como subrasante.

En el caso del suelo de la IX Región, el suelo natural exhibe una resistencia de alrededor de 7 kgf/cm², lo que indica que es un suelo arcilloso de relativa buena calidad en estado seco. Al estabilizarlo con un 20 % de ceniza FA.d se obtiene una resistencia mecánica de alrededor de 14 kgf/cm², lo que es una importante mejora en las propiedades del suelo.

Por otro lado, como resultado de la investigación, se desarrolló un método de dosificación para diseñar mezclas suelo - ceniza FBC, y se realizó el diseño preliminar de una prueba a escala real.

7. REFERENCIAS

AASHTO-AGC-ARTBA Joint Committee, **Guidelines and Guide Specifications for Using Pozzolanic Stabilized Mixture and Fly Ash for In-Place Subgrade Soil Modification**, AASHTO, Washington, 1990.

Committee of State Road Authorities, **Technical Recommendations for Highways - Cementitious Stabilizers in Road Construction**, Department of Transport, South Africa, 1986.

Conn, R. E., Sellakumar, K., Bland, A. E., **Utilization of CFB Fly Ash for Construction Applications**, Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Savannah, Georgia, 1999.

Deschamp, R. J., **Using Fluidized Bed Combustion and Stoker Ash as Structural Fill: A Case Study**, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, N° 11, 1998.

Imperial Chemical Industries, **Lime Stabilisation Manual**, 1986.

Misra, A., **Utilization of Western Coal Fly Ash in Construction of Highways in the Midwest**, Mid-America Transportation Center, Lincoln, Nebraska, 2000.

Terrel, R., Epps, J., Barenberg, E., Mitchell, J., Thompson, M., **Soil Stabilization in Pavement Structures - A User's Manual**, FHWA, US Department of Transportation, Washington, 1979.

The National Lime Association, **Stabilization of Soils Containing Sulfates**, Technical Memorandum, Arlington, Virginia, 2000.

Tishmack, J. K., Deschamp, R., **Use of Fluidized Bed Combustion Ash in Structural Fill: Chemical, Mineralogical, and Engineering Properties**, Proceedings 13th International Symposium on Use and Management of Coal Combustion Products (CCPs), Orlando, Florida, 1999.

Transportation Research Board, **Lime Stabilization - Reactions, Properties, Design and Construction**, TRB, Washington, 1987.