



RC 2018 xvii Reunión
del **CONCRETO**

El evento del Cemento, el Concreto y los Prefabricados



OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DE LAS CENIZAS VOLANTES DE CARBON

*Ing. Germán Arbeláez
ECORE GROUP, LLC
Colombia / USA*



Cenizas de la Combustión del Carbón

Son materiales **silico-aluminosos** obtenidos del proceso de **combustión de carbón** utilizado para la generación de energía eléctrica en centrales térmicas.



- ✓ Cenizas volantes – ‘Fly Ash’:
Material volátil de alta finura.
- ✓ Cenizas de fondo – ‘Bottom Ash’:
Material grueso que por su masa se precipita.



También se pueden obtener, a menor escala, por la combustión de carbón en calderas industriales.

Generación de Cenizas: Problema Multidimensional

SOCIAL

- Relaciones con la Comunidad
- Riesgo para la Continuidad Operacional



AMBIENTAL

- Vertederos / Botaderos / Rellenos
- Riesgo de Catástrofe Ambiental



Tennessee,
USA (2008)



ECONOMICO

Costos asociados a:

- Manejo **RESPONSABLE** de Residuos
- Deterioro de Relaciones con la Comunidad Vecina
- Accidente Ambiental
- Desperdicio de Combustible





✓ Sustituto de Materiales Granulares

- Bases Granulares
- Terraplenes
- Rellenos
-



✓ Material Cementante Suplementario (SCM)

- Extensor de Clinker
- Adición Activa en el Concreto



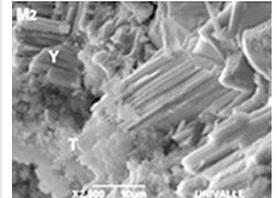
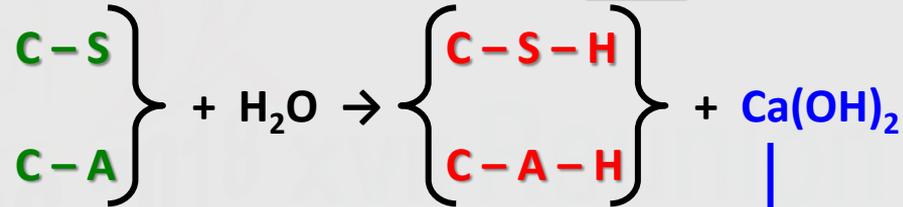
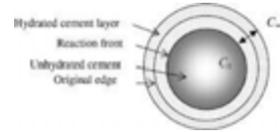
S
O
S
T
E
N
I
B
I
L
I
D
A
D

E
N
E
L
T
I
E
M
P
O

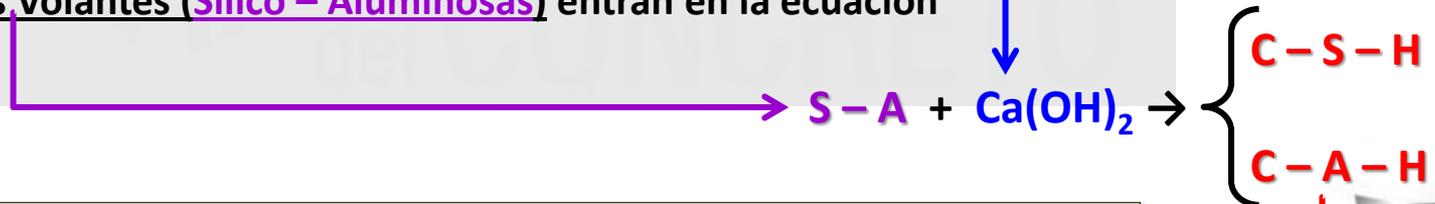
Por qué las Cenizas Volantes son útiles como SCM's

Una revisión rápida del proceso de hidratación del Cemento Portland

- ✓ El cemento está principalmente compuesto de **Silicatos y Aluminatos de Calcio**
- ✓ que al combinarse con agua forman **Silicatos y Aluminatos de Calcio HIDRATADOS**
- ✓ Como sub-producto de la Hidratación queda **Hidróxido de Calcio Libre** o 'Portlandita'



- ✓ Cuando las Cenizas Volantes (Silico - Aluminosas) entran en la ecuación



El uso de Cenizas Volantes en Concreto promueve la generación de Productos de Hidratación adicionales y suplementarios

Pero las Cenizas Volantes NO siempre se pueden utilizar como SCM

Porque en ocasiones sus propiedades físico-químicas NO les permiten desarrollar su potencial cementante

Sin embargo, existen múltiples SOLUCIONES para VIABILIZAR su utilización como SCM



Teniendo que recurrir a vertederos o "botaderos"



Que se requiere para que una Ceniza sea útil como SCM

Respondamos a la pregunta

¿Cuál es el origen de la reactividad de la ceniza o cualquier otro SCM?

- ✓ **Alta FINURA** - Preferiblemente debe proceder de carbón pulverizado
- ✓ **Baja HUMEDAD** - Preferible usar ceniza fresca almacenada en silos
- ✓ **Poca CONTAMINACION** - Preferiblemente con bajo inquemado u otros contaminantes
- ✓ **COMPOSICION QUIMICA adecuada**
- ✓ **MINERALES en estado AMORFO** - Preferiblemente carbón quemado a alta temperatura

INDICE DE
ACTIVIDAD

Requisitos especificados para el uso de Cenizas Volantes como SCM's

Norma **ASTM C-618**: 'Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete' (equivalente en Colombia **NTC 3493**)

Clase	F	C
Fuente más común	Carbones bituminosos y antracita	Carbones sub-bituminosos y lignito
CaO	---	Mín. 10%
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Mín. 70%	Mín. 50%
SO ₃	Mín. 5%	Mín. 5%
Humedad	Máx. 3%	Máx. 3%
Cont. de Inquemados¹	Máx. 6% (hasta Máx. 12% ²)	Máx. 6%
Ret. en Tamiz 45µm	Máx. 34%	Máx. 34%
Indice Actividad	Mín. 75% a 7 y 28 días	Mín. 75% a 7 y 28 días

¹ Pérdida por ignición

² Si resultados de laboratorio muestran desempeño aceptable

Optimización de Cenizas Volantes para Potenciar o Viabilizar su uso como Material Cementante Suplementario (SCM)

Optimización de la Finura

✓ Reducción de Tamaño por medios mecánicos (Molienda)

➤ Búsqueda de la finura de activación

➤ Densificación ('Fillerización')

➤ El beneficio obtenido en términos de desempeño debe justificar los costos asociados a la molienda (energía principalmente)



✓ Reducción de Tamaño por Clasificación

➤ Es posible pero se pierde material del que necesariamente hay que disponer



Caso de Estudio 1

Optimización de la Finura

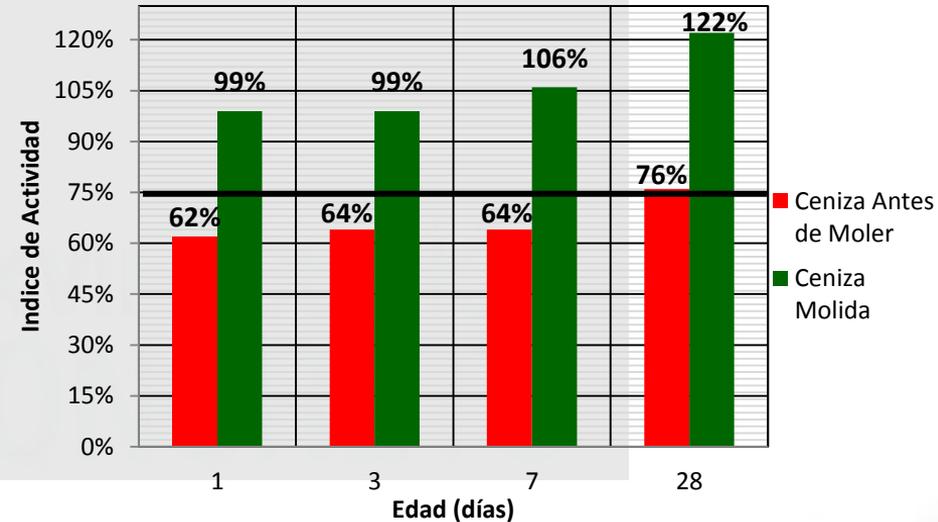
Ceniza Beneficiada de una Termoeléctrica en Colombia (Cerca de Bogotá)

Composición Química

- SiO_2 : 50.9%
- Al_2O_3 : 20.1%
- Fe_2O_3 : 4.2%
- CaO : 10.2%
- MgO : 0.6%
- SO_3 : 1.2%
- Na_2O : 0.3%
- K_2O : 1.3%
- PPI¹: 5.9%

% Retenido en Malla :	Finura Ceniza Antes de Moler	Finura Ceniza Molida
#325 (45 μm)	38%	5%
#450 (32 μm)	-	30%

Índice de Actividad determinado con una combinación de 70% Cemento y 30% Ceniza



¹PPI: Pérdida Por Ignición (ensayo para estimar el contenido de Carbón Inquemado)

Optimización de la Humedad

- ✓ La optimización obvia es someter la ceniza a un proceso de secado.
- ✓ Normalmente se requiere en caso de que la Ceniza haya estado depositada en un vertedero, caso en el cual podría estar contaminada con otros residuos.
- ✓ La energía requerida (y el costo asociado) podría quitarle viabilidad al reaprovechamiento de la ceniza.
- ✓ Lo recomendable es concentrarse en la ceniza fresca y reducir o detener por completo la disposición en vertederos o botaderos.

Reducción del Contenido de Carbón Inquemado

El alto contenido de inquemados (> 6% según ASTM C-618) no es deseable por:

- ✓ El **desempeño mecánico** del carbón es **pobre** (blando, deleznable)
- ✓ El contenido de carbón **disminuye la proporción de la fracción mineral** que es la que tiene el potencial de desarrollar propiedades aglomerantes
- ✓ Se reduce o elimina el **efecto de los aditivos inclusores de aire** porque el carbón los absorbe. Esto puede ser un gran inconveniente porque son necesarios para mitigar el fenómeno de congelamiento y deshielo en regiones con estaciones extremas
- ✓ Se **reduce el potencial de sustitución de cemento** en el concreto (o de clinker en el cemento)
- ✓ Afecta el **color del concreto**

La reducción del contenido de 'inquemados' puede VIABILIZAR el reciclaje de ceniza de fuentes donde no hay una opción diferente a disponer de ella en vertederos

Métodos para Reducir el Contenido de Carbón Inquemado (o su Efecto) en Cenizas Volantes

Método	Ventajas	Limitaciones
Clasificación Gravimétrica (ciclónica,...)	<ul style="list-style-type: none"> • Viabiliza el uso de cenizas que no cumplen como SCM • No se destruyen las xenosferas¹ • Permite optimizar la finura 	<ul style="list-style-type: none"> • La inversión puede ser alta • Si se realiza por Flotación requiere agua y luego secado • Altos costos de operación (agua, energía)
Clasificación por Tamizaje	<ul style="list-style-type: none"> • Viabiliza el uso de cenizas que no cumplen como SCM • Permite optimizar la finura 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo funciona si las fracciones mineral y orgánica tienen tamaño diferencial
Combustión del Carbón (CBO)	<ul style="list-style-type: none"> • Viabiliza el uso de cenizas que no cumplen como SCM 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto Consumo de Energía (Costo) • Emisiones adicionales asociadas a la combustión
Pasivación Química del Carbón	<ul style="list-style-type: none"> • Mitiga el efecto dañino del carbón en concreto con aire incluido, aprovechando su habilidad para absorber agentes orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de los agentes orgánicos • Beneficio se limita a concretos con aire incluido • No beneficia las propiedades puzolánicas
Separación Triboelectrostática	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo Consumo de Energía • Emisiones mínimas • Recuperación de Combustible. • Eliminación del 100% de los residuos • Baja complejidad operativa y bajo OPEX 	<ul style="list-style-type: none"> • La ceniza debe estar seca • No funciona con cenizas gruesas • Inversión inicial puede ser alta

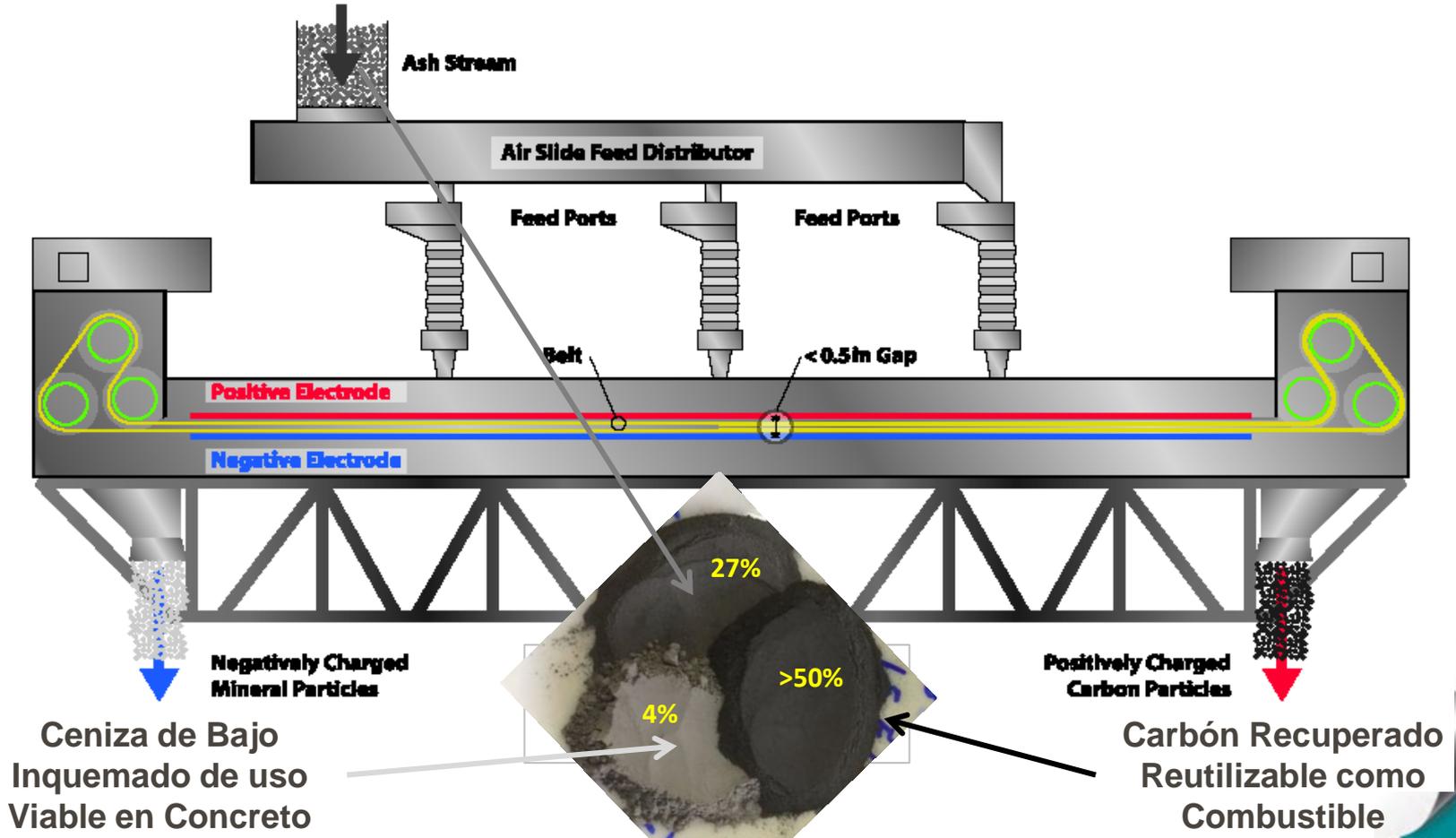
¹ Las partículas de ceniza son de forma esférica y por eso el uso de este SCM beneficia la manejabilidad del concreto

Separación Triboelectrostática de Cenizas Volantes

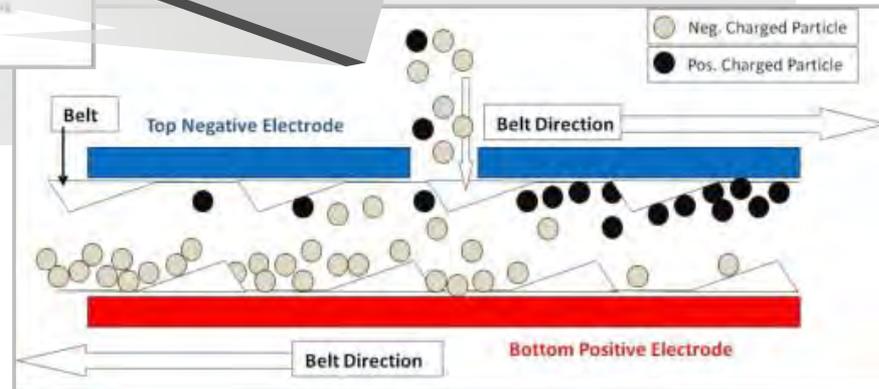
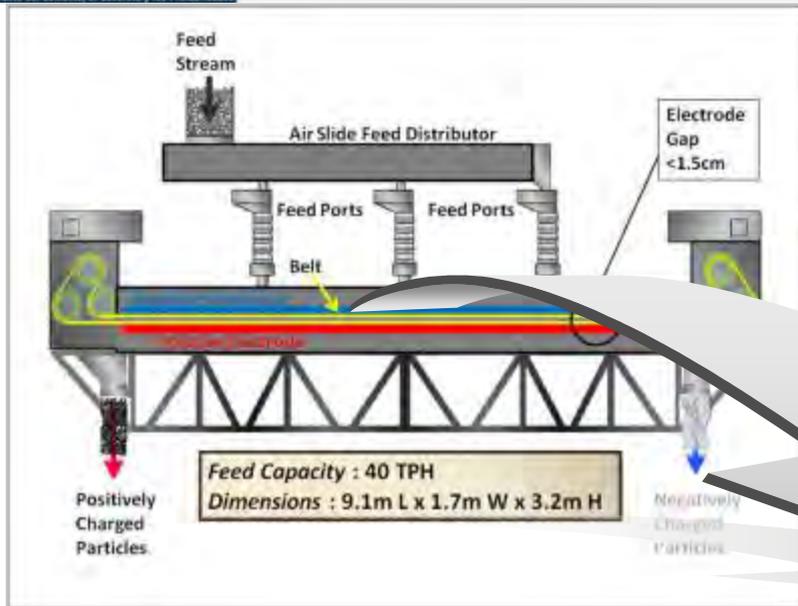


- ✓ Partículas se **cargan por contacto** superficial, sin necesidad de inducción de fuentes externas , (la transferencia de electrones se basa en la naturaleza química DIFERENTE de las partículas a separar)
- ✓ Efectivo en partículas finas (<math><1\mu\text{m}</math> – 500 $\mu\text{m}</math>)$
- ✓ Baja demanda de espacio ('footprint')

Detalle Interno de un Separador Triboelectrostático de Cenizas Volantes



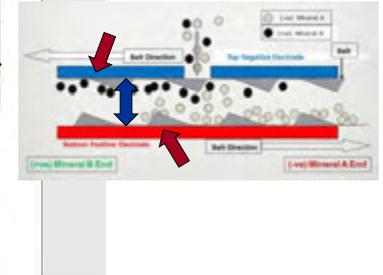
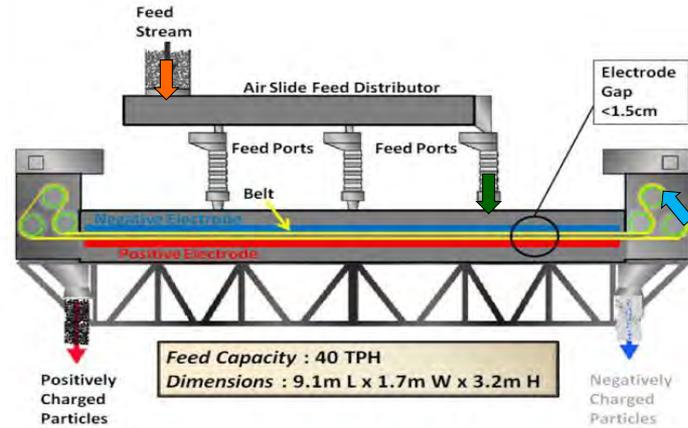
Esquema de un Separador Triboelectrostático de Cenizas Volantes



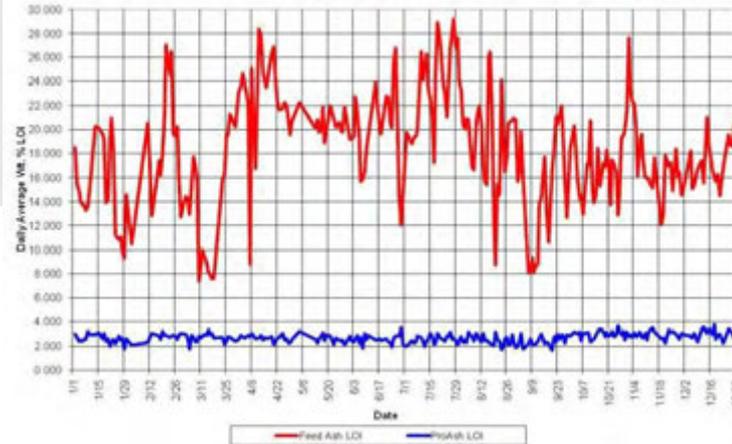
Operación de un Separador Triboelectrostático de Cenizas Volantes

Optimization

- ✓ **Parámetros de Operación**
 - **Velocidad de Alimentación**
 - **Puerto de Entrada**
 - **Velocidad Banda**
 - **Distancia entre Electrodo**
 - **Voltaje Alimentado**
- ✓ **Permite obtener una ceniza de calidad uniforme a partir de condiciones altamente variables**



Daily Average Feed ash and ProAsh LOI
ST Jacksonville



Principio de Funcionamiento de un Separador Triboelectrostático de Cenizas Volantes



-  Neg. Charged Particle
-  Pos. Charged Particle

← Belt Direction

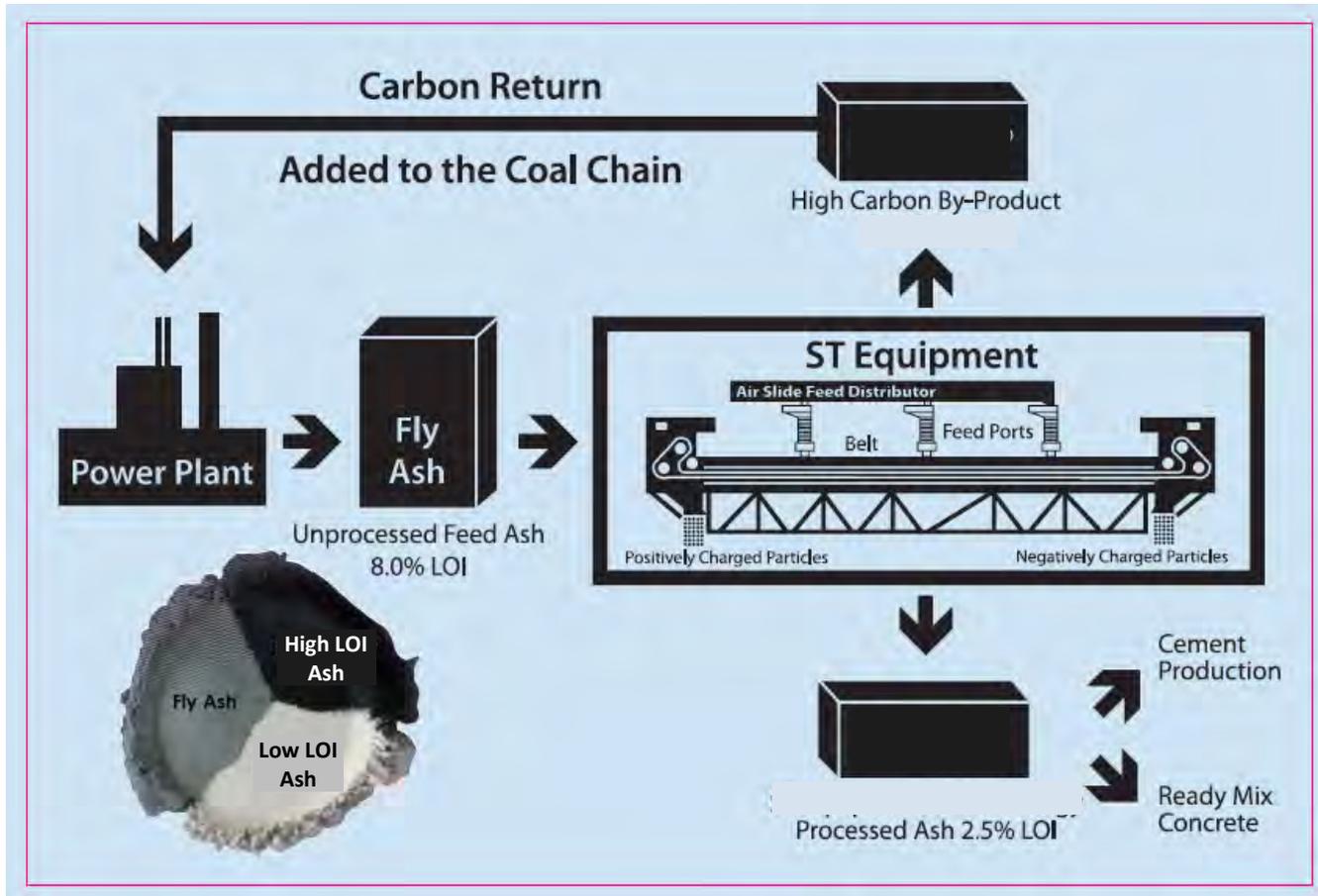
Top Positive Electrode

Bottom Negative Electrode

Belt Direction →



La Separación Triboelectrostática promueve un Proceso de CERO Residuos



La Ceniza procesada en Separadores Triboelectrostáticos puede ser utilizada eficientemente en la producción de concreto



Miles de toneladas de Ceniza procesada en Separadores Triboelectrostáticos se utilizó con éxito en la producción del concreto empleado en la construcción del nuevo **World Trade Center** en la ciudad de Nueva York, para mejorar propiedades asociadas a la resistencia, la durabilidad, la manejabilidad y el calor de hidratación.



El Carbón recuperado gracias a la Separación Triboelectrostática de Cenizas puede ser quemado nuevamente por el generador del residuo



Si todo el Carbón recuperado se realimenta al proceso de combustión TODOS los residuos generados por la Termoeléctrica serán reutilizados y los sitios de disposición eliminados

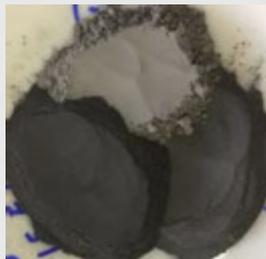
Caso de Estudio 2

Reducción de Inquemados Ceniza Aceptable

Ceniza de una Termoeléctrica en Colombia (Región Central)

Composición Química

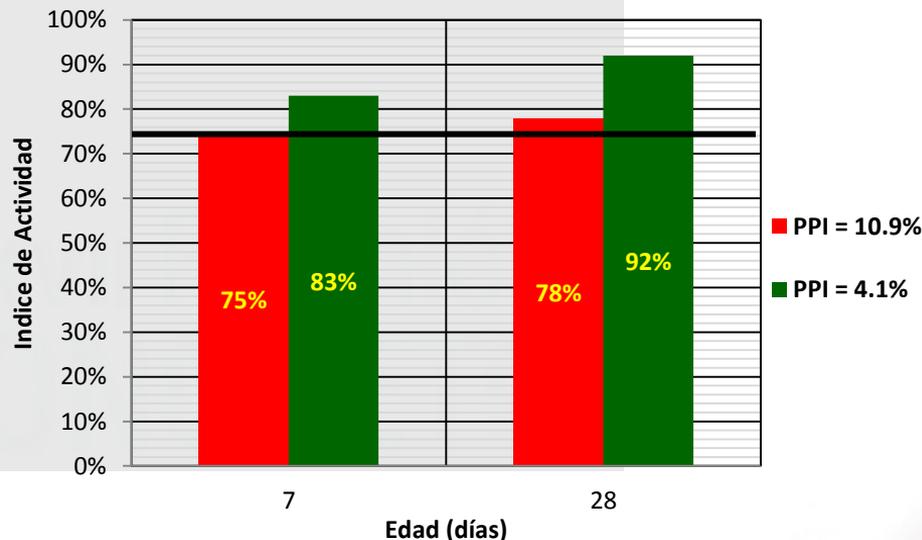
- SiO₂: 57.4%
- Al₂O₃: 20.8%
- Fe₂O₃: 5.1%
- CaO: 0.8%
- MgO: 1.3%
- SO₃: 0.2%
- Na₂O: 0.03%
- K₂O: 1.9%
- PPI¹: 10.9%



Finura

- % Retenido en Malla #325 (45µm): 30.2%

Índice de Actividad determinado con una combinación de 80% Cemento y 20% Ceniza



¹PPI: Pérdida Por Ignición (ensayo para estimar el contenido de Carbón Inquemado)

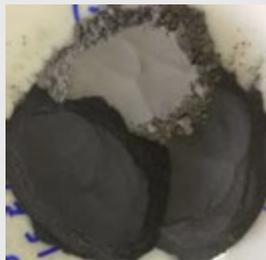
Caso de Estudio 3

Reducción de Inquemados Ceniza Inviabile

Ceniza de una Termoeléctrica en Colombia (Región Norte)

Composición Química

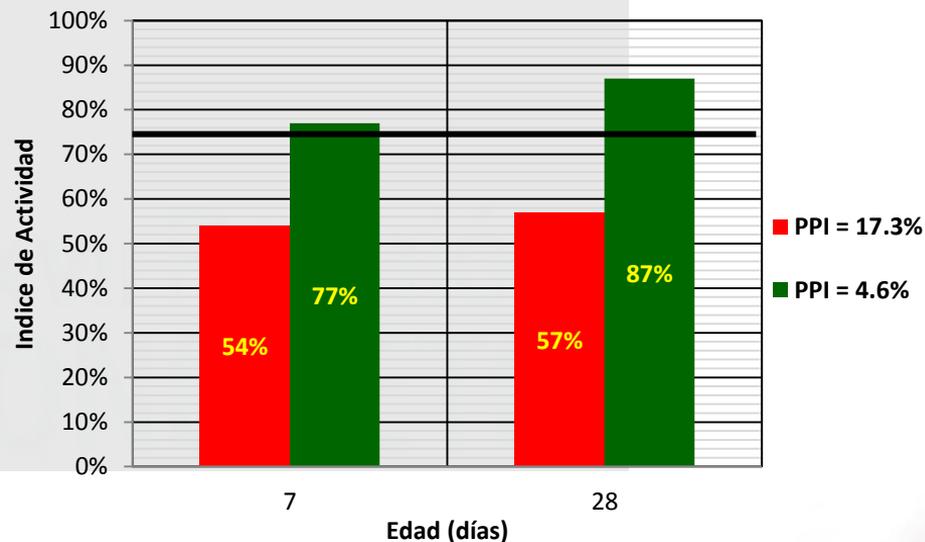
- SiO₂: 49.1%
- Al₂O₃: 18.7%
- Fe₂O₃: 7.1%
- CaO: 1.5%
- MgO: 0.9%
- SO₃: 0.4%
- Na₂O: 0.4%
- K₂O: 1.2%
- PPI¹: 19.5%



Finura

- % Retenido en Malla #325 (45µm): 32.3

Índice de Actividad determinado con una combinación de 80% Cemento y 20% Ceniza



¹PPI: Pérdida Por Ignición (ensayo para estimar el contenido de Carbón Inquemado)

Optimización Química

- ✓ Activación Alcalina /Geopolimerización
- ✓ Uso de Catalizadores Alcalinos
 - ✓ Silicato de Sodio
 - ✓ Hidroxido de Potasio
 - ✓ Hidróxido de Sodio
 - ✓ ...
- ✓ Aumento de la actividad puzolánica
- ✓ Mayor potencial de sustitución de cemento
- ✓ El costo asociado a la catálisis es relevante
- ✓ Procesos externos pueden ser requeridos (calor en algunos casos)

Beneficios que se derivan del Uso de Cenizas de Carbón

Reaprovechamiento de Residuos

- ✓ Ecología Industrial
 - *Ciclo Abierto: Vertimiento de Residuos*
 - *Ciclo Cerrado: Re-utilización de Residuos*
- ✓ El uso de Cenizas en concreto/cemento es coherente con los principios de la ecología industrial ya que promueve la conversión de Ciclos Abiertos en Cerrados
- ✓ Se minimiza la generación de emisiones de partículas fugitivas y dispersas
- ✓ Se reduce y eventualmente se elimina la necesidad de conformar y mantener rellenos

Beneficios por su uso en Cemento

- ✓ Menor demanda de energía por menores requerimientos de clinker
- ✓ Menos emisiones de CO₂
- ✓ Menor demanda de energía por mayor facilidad de molienda
- ✓ Beneficios económicos sujetos a “competencia” con otras fuentes de adición

Beneficios por su uso en Concreto

- ✓ La ceniza reemplaza parcialmente el cemento en la producción de concreto
- ✓ Menor consumo de cemento implica una reducción del factor de clinker de la mezcla de concreto
 - *Menor consumo de energía*
 - *Menos emisiones de CO₂*

- ✓ Mejora las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto

Trabajabilidad - Resistencia a Largo Plazo - Densidad - Permeabilidad - Durabilidad

- ✓ Beneficios económicos sujetos a “competencia” con otras fuentes de adición

Gracias !!!

german.arbelaez@ecoregroup.net

german.arbelaez@tecnologiaenobra.com

+57-318-2821467