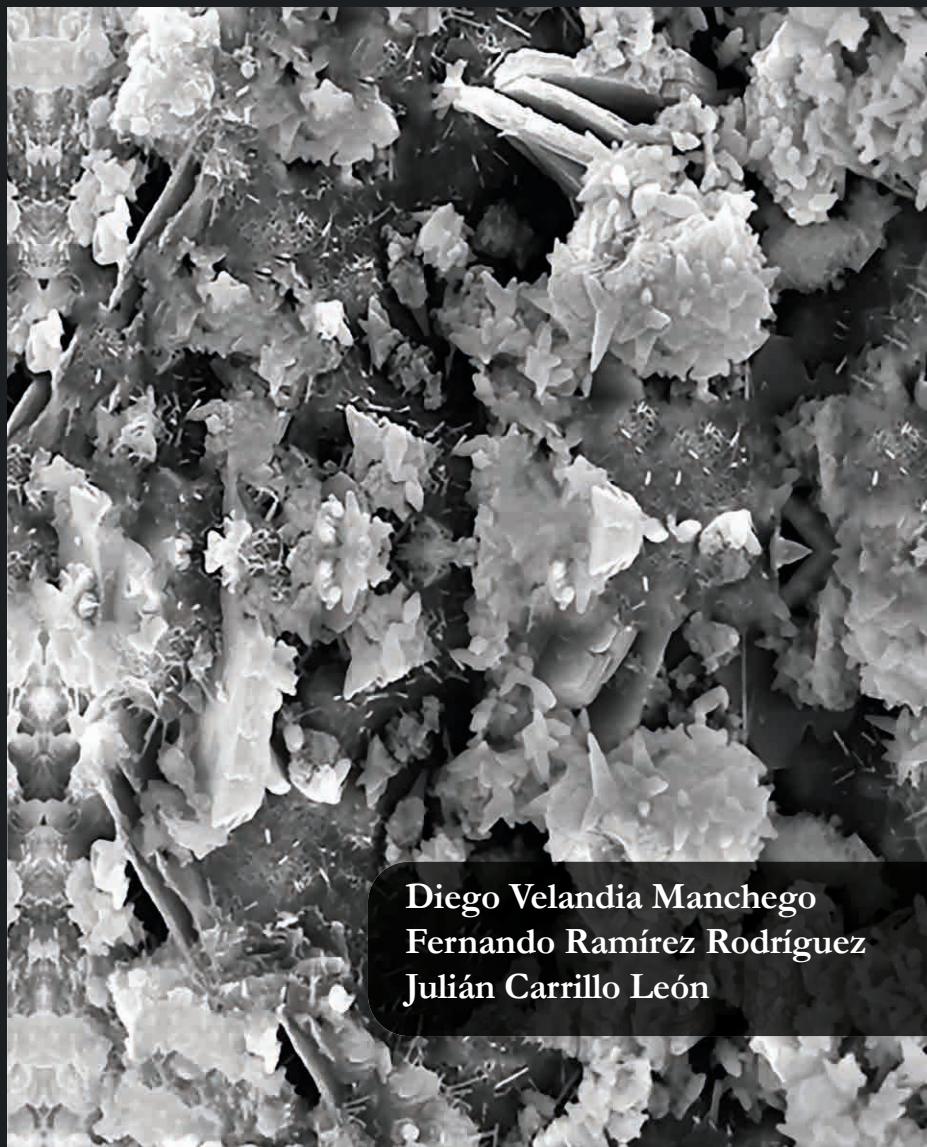


# Concretos con cenizas volantes

provenientes de termoeléctricas



Diego Velandia Manchego  
Fernando Ramírez Rodríguez  
Julián Carrillo León

ECO  
EDICIONES

## **Diego Velandia Manchego**

Ingeniero Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, MIC en Estructuras de la Universidad de Los Andes, M.Sc. en Estructuras y Materiales de Cardiff University, MPhil de University of Sheffield y actualmente estudiante de doctorado de la misma Universidad. Miembro de diferentes comités del ACI y del Institution of Structural Engineers en el Reino Unido. Autor de conferencias y artículos en revistas indexadas. Diferentes reconocimientos como becas y matrículas de honor, The Presidential Academic Award de la Presidencia de los Estados Unidos y The South Wales Institute of Engineering Award en el Reino Unido. Experiencia en Investigación de la British Petroleum y Corus Group Steel Producer en Inglaterra. Actualmente Jefe de Desarrollo Técnico de Argos.

## **Fernando Ramírez Rodríguez**

Ingeniero Civil de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, M.Sc. y Ph.D. en Ingeniería Civil y Mecánica Computacional de Colorado State University. Actualmente profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes e investigador del Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, del Grupo de Mecánica Computacional y del Grupo de Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes. Es autor de múltiples artículos en revistas internacionales con un alto número de citas, así como numerosas conferencias nacionales e internacionales. Ha trabajado en diferentes áreas tales como nano-mecánica, materiales compuestos, comportamiento del concreto, comportamiento de guadua rolliza y laminada y mecánica computacional, entre otros.

# *Concretos con cenizas volantes provenientes de termoeléctricas*

**Diego Velandia Manchego  
Fernando Ramírez Rodríguez  
Julián Carrillo León**

## Tabla de contenido

1. Resumen .....	1
2. Introducción .....	3
3. Marco teórico .....	7
3.1 Clasificación de las cenizas volantes .....	7
3.2 Composición de la ceniza volante .....	9
3.2.1 Composición química .....	10
3.2.2 Características físicas de la ceniza .....	10
3.3 Ceniza volante en el concreto .....	11
3.3.1 Concreto en estado fresco.....	12
3.3.3.1 Permeabilidad a cloruros.....	20
3.3.3.2 Resistencia a sulfatos.....	21
3.3.3.3 Reacción álcali agregado .....	22
3.3.2 Concreto en estado endurecido .....	17
3.3.3 Durabilidad del concreto .....	19
3.3.4 Mezclas binarias cemento - ceniza .....	24
3.3.5 Mezclas ternarias cemento - ceniza - escoria .....	26

3.4 Mejoras de la ceniza volante para su uso en el concreto .....	27
3.4.1 Separación triboelectrostática .....	27
3.4.2 Combustión de inquemado .....	28
4. Caracterización de la ceniza volante .....	29
4.1 Caracterización química de la ceniza .....	29
4.2 Caracterización física de la ceniza.....	30
4.3 Comparativo respecto a diferentes fuentes de ceniza.....	31
5. Mezclas de concreto con ceniza volante .....	35
5.1 Características de mezcla.....	35
5.1.1 Verificación de la granulometría óptima de la mezcla ...	35
5.2 Fase 1 .....	37
5.2.1 Mezclas binarias .....	42
5.2.1.1 Comportamiento en estado fresco .....	43
5.2.1.2 Comportamiento en estado endurecido .....	44
5.2.2 Mezclas ternarias .....	49
5.2.2.1 Escoria 20% .....	50
5.2.2.1.1 Comportamiento en estado fresco ....	50
5.2.2.1.2 Comportamiento en estado endurecido .....	51
5.2.2.2 Escoria 15% .....	55
5.2.2.2.1 Comportamiento en estado fresco ....	55
5.2.2.2.2 Comportamiento en estado endurecido .....	56
5.3 Fase 2 .....	60
5.3.1 Mezclas binarias .....	61
5.3.2. Mezclas ternarias .....	64
5.3.2.1 Escoria 20% .....	64
5.3.2.2 Escoria 15% .....	66

6. Conclusiones .....	71
7. Recomendaciones .....	75
8. Bibliografía .....	77
9. Anexos .....	80
10. Índice temático.....	101

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Intervalos de composición química de ceniza dependiendo del tipo de carbón [1] .....	8
Tabla 2. Requerimientos químicos indicados en ASTM C-618 [2] .....	8
Tabla 3. Requerimientos físicos indicados en ASTM C-618 [2] .....	9
Tabla 4. Influencia de las adiciones en concretos en estado fresco [9].	12
Tabla 5. Efecto de la ceniza volante respecto al requerimiento de agua [10] .....	13
Tabla 6. Efecto de la ceniza volante en la exudación del concreto [11] .....	14
Tabla 7. Variación del contenido de aire en el tiempo utilizando cenizas tipo F y C [11].....	15
Tabla 8. Influencia de las adiciones en concretos expuestos a diferentes ambientes [9] .....	19
Tabla 9. Influencia de las adiciones en concretos expuestos a diferentes ambientes [9] .....	20
Tabla 10. Composición química de la ceniza: requerimientos obligatorios .....	29
Tabla 11. Composición química de la ceniza: requerimientos opcionales.....	30
Tabla 12. Características físicas de la ceniza .....	31
Tabla 13. Comparativo de composición química de diferentes cenizas: requerimientos obligatorios .....	32
Tabla 14. Comparativo de composición química de diferentes cenizas: requerimientos opcionales .....	32

Tabla 15. Comparativo de las características físicas de la ceniza.....	33
Tabla 16. Granulometría de la grava, arena y la mezcla óptima de agregado .....	36
Tabla 17. a) Mezclas binarias, b) Mezclas ternarias .....	38
Tabla 18. Pruebas industriales .....	41
Tabla 19. Contenido de aire.....	43
Tabla 20. Pérdida de manejabilidad 60' .....	44
Tabla 21. a) Cementante constante, porcentaje de ceniza variable, b) Cementante variable, porcentaje de ceniza constante .....	45
Tabla 22. Contenido de aire.....	50
Tabla 23. Pérdida de manejabilidad 60'.....	50
Tabla 24. a) Cementante constante, porcentaje de ceniza variable, b) Cementante variable, porcentaje de ceniza constante .....	51
Tabla 25. Contenido de aire. ....	55
Tabla 26. Pérdida de manejabilidad 60' .....	56
Tabla 27. a) Cementante constante, porcentaje de ceniza variable, b) Cementante variable, porcentaje de ceniza constante .....	57
Tabla 28. a) Mezclas binarias, b) Mezclas ternarias .....	61

## Lista de figuras

Figura 1.	Forma de la ceniza volante [3].....	11
Figura 2.	Influencia del inquemado en el contenido de aire en la mezcla [4].....	15
Figura 3.	Evolución de las resistencias para concretos con 307 kg/m <sup>3</sup> de material cementante y 25% de ceniza [14].....	17
Figura 4.	Comparativo de resistencias utilizando diferentes adiciones [9]. ....	18
Figura 5.	Evolución de resistencias con diferentes proporciones de ceniza: (S) Substitución de cemento, (P) Substitución parcial de cemento y arena, (A) Adición de ceniza [15] .....	19
Figura 6.	Influencia del curado, resistencia y porcentaje de sustitución en la permeabilidad a cloruros según ASTM C-1202 [17] ...	20
Figura 7.	Influencia de la resistencia y el porcentaje de sustitución al ataque a sulfatos ASTM C1012 [18].....	21
Figura 8.	Carbonatación dependiendo del curado, resistencia y porcentaje de sustitución .....	22
Figura 9.	Efecto del contenido de óxido de calcio y el porcentaje de sustitución de diferentes cenizas y la escoria [20]. ....	23
Figura 10.	Efecto del porcentaje de sustitución para una ceniza tipo F [16]. ....	24
Figura 11.	Variación de resistencia para un concreto de 27,6 MPa (4000 psi) con diferentes porcentajes de ceniza.....	25
Figura 12.	Variación de resistencia para un concreto de 34,5 MPa (5000 psi) con diferentes porcentajes de ceniza.....	25
Figura 13.	Evolución de resistencia de diferentes mezclas ternarias [21] .....	26
Figura 14.	Separación triboelectrostática [22]. ....	27
Figura 15.	Combustión de inquemado [23]. ....	28



Figura 16. Gráfica comparativa de los parámetros químicos entre diferentes cenizas. ....	33
Figura 17. Granulometrías de diferentes autores vs. diseño. ....	36
Figura 18. Método gráfico .....	37
Figura 19. Ensayos en estado fresco. ....	42
Figura 20. Evolución de resistencias.....	43
Figura 21. Evolución de resistencias - 276 kg/m <sup>3</sup> .....	47
Figura 22. Evolución de resistencias - 278 kg/m <sup>3</sup> .....	47
Figura 23. Evolución de resistencias - 286 kg/m <sup>3</sup> .....	48
Figura 24. Evolución de resistencias - 10% .....	48
Figura 25. Evolución de resistencias - 15% .....	49
Figura 26. Evolución de resistencias - 18% .....	49
Figura 27. Evolución de resistencias - 276 kg/m <sup>3</sup> .....	53
Figura 28. Evolución de resistencias - 281 kg/m <sup>3</sup> .....	53
Figura 29. Evolución de resistencias - 283 kg/m <sup>3</sup> .....	54
Figura 30. Evolución de resistencias - 8% .....	54
Figura 31. Evolución de resistencias - 10% .....	54
Figura 32. Evolución de resistencias - 13% .....	55
Figura 33. Evolución de resistencias - 276 kg/m <sup>3</sup> .....	58
Figura 34. Evolución de resistencias - 278 kg/m <sup>3</sup> .....	59
Figura 35. Evolución de resistencias - 288 kg/m <sup>3</sup> .....	59
Figura 36. Evolución de resistencias - 13% .....	59
Figura 37. Evolución de resistencias - 15% .....	60
Figura 38. Evolución de resistencias - 20% .....	60

Figura 39. Ensayos en estado fresco - Mezclas binarias. ....	62
Figura 40. Tiempos de fraguado - Mezclas binarias. ....	62
Figura 41. Calorimetrías - Mezclas binarias. ....	63
Figura 42. Evolución de resistencias - Mezclas binarias. ....	63
Figura 43. Ensayos en estado fresco - Mezclas ternarias (20% Escoria) .....	64
Figura 44. Tiempos de fraguado - Mezclas ternarias (20% Escoria) ....	65
Figura 45. Calorimetrías - Mezclas ternarias (20% Escoria) .....	65
Figura 46. Evolución de resistencias - Mezclas ternarias (20% Escoria) .....	66
Figura 47. Ensayos en estado fresco - Mezclas ternarias (15% Escoria) .....	66
Figura 48. Tiempos de fraguado - Mezclas ternarias (15% Escoria) ....	67
Figura 49. Calorimetrías - Mezclas ternarias (15% Escoria) .....	68
Figura 50. Evolución de resistencias - Mezclas ternarias (15% Escoria) .....	68

## 1. Resumen

En este estudio se evaluaron mezclas de concreto con ceniza volante tipo F, con el fin de buscar el potencial en cuanto a mejoras en el desempeño del diseño (asentamiento, manejabilidad, contenido de aire, resistencias). Este proyecto se desarrolló en dos fases; la primera fase consistió en el estudio físico y químico de la ceniza, así como también ensayos en estado fresco y endurecido de las mezclas de concreto usando ceniza. Las pruebas iniciales desarrolladas en la mezcla de concreto buscaban encontrar los diseños ideales para estudiar con una mayor profundidad en la segunda fase. En la primera fase se hicieron 104 mezclas, en donde los diseños contemplaron mezclas binarias (cemento y ceniza) y ternarias (cemento, escoria y ceniza).

Dentro de las consideraciones iniciales para la primera parte, se desarrollaron mezclas binarias variando el contenido de material cementante de  $276 \text{ kg/m}^3$  hasta  $303 \text{ kg/m}^3$  y el porcentaje de ceniza de 8% a 20%. Con respecto a las mezclas ternarias, se varió el mismo contenido de material cementante y porcentaje de ceniza, pero utilizando dos porcentajes fijos de escoria: el 15% y 20%.

Para la segunda fase del estudio se seleccionaron los diseños que mejor comportamiento tuvieron en la primera fase; esto en cuanto a ensayos en estado fresco y en estado endurecido. Las mezclas binarias fueron: cementante  $278 \text{ kg/m}^3$  - 13% ceniza, cementante  $278 \text{ kg/m}^3$  - 15% ceniza, cementante  $281 \text{ kg/m}^3$  - 18% ceniza y cementante  $286 \text{ kg/m}^3$  - 18% ceniza. Las mezclas ternarias seleccionadas fueron: cementante  $276 \text{ kg/m}^3$  - 8% ceniza - 20% escoria, cementante  $281 \text{ kg/m}^3$  - 10% ceniza - 20% escoria, cementante  $283 \text{ kg/m}^3$  - 13% ceniza - 20% escoria, cementante  $276 \text{ kg/m}^3$  - 13% ceniza - 15% escoria y cementante  $278 \text{ kg/m}^3$  - 15% ceniza - 15% escoria.

Finalmente, se seleccionaron tres mezclas óptimas: la mezcla binaria de  $278 \text{ kg/m}^3$  de cementante y el 13% de ceniza y dos mezclas ternarias, la primera con  $276 \text{ kg/m}^3$  de cementante, 20% de escoria y 8% de ceniza, y la segunda con  $276 \text{ kg/m}^3$  de cementante, 15% de escoria y 13% de ceniza.

La mayoría de las mezclas binarias evaluadas presentaron resistencias mayores con respecto al testigo tanto a los 28 días como a los 56 días, a pesar de que estas resistencias disminuían al aumentar el porcentaje de sustitución. Las pérdidas de manejabilidad aumentaron simultáneamente con el incremento del porcentaje de ceniza y del material cementante, debido a la influencia del inquemado y a su interacción con el aire naturalmente atrapado.

Las mezclas ternarias presentaron una evolución significativa en las resistencias iniciales; sin embargo, el incremento de la resistencia de los 28 días a 56 días no fue tan alto como en el caso de las mezclas binarias. Por otro lado, la pérdida de manejabilidad no fue mayor debido al alto contenido de adición (ceniza + escoria) y al efecto que esto tiene en la disminución del calor de hidratación.

Es importante seguir evaluando mezclas ternarias y cuaternarias, enfocando los estudios en el efecto de las diferentes adiciones (escoria, ceniza, puzolana natural, metacaolín y humo de sílice) sobre las resistencias residuales que se generan. También es importante seguir evaluando el comportamiento en estado fresco de las mezclas, vinculando los diferentes componentes de las adiciones, tales como sílice, calcio, aluminio o el inquemado. Con estos estudios se logra caracterizar las fuentes a nivel nacional, lo que permite el avance en la tecnología del concreto y aporta, no solo al desempeño de la estructura, sino también a la disminución de la huella de CO<sub>2</sub>.

## 2. Introducción

La ceniza volante y su uso en las mezclas de concreto han sido explorados y desarrollados en varios países, llegando a su aplicación en productoras de concreto. En Colombia, la aplicación de cenizas volantes no ha sido amplia debido al desconocimiento, no solo de los beneficios que este material puede llegar a tener, sino también de las posibles fuentes disponibles para su consecución. Por consiguiente, es importante reconocer que la ceniza volante es un subproducto proveniente de la quema de carbón, principalmente de termoeléctricas o de procesos de industrias que autogeneran energía. Asimismo, la ceniza volante puede provenir de diferentes tipos de carbón, tales como bituminoso o subbituminoso. El tipo de ceniza volante que se encuentra en el país es la proveniente de la quema de carbón bituminoso, y es generada por las principales termoeléctricas que abastecen de energía al país. Es importante conocer el tipo de carbón, ya que en parte de esto depende el desempeño de las cenizas dentro del concreto.

La ceniza volante es conocida por sus beneficios en términos de durabilidad en mezclas de concreto. Con esta adición se pueden llegar a mitigar problemas de ataque por cloruros, sulfatos y la reacción álcali agregado; por ejemplo, sus propiedades puzolánicas permiten la reducción de la penetración de cloruros a mayores edades [1-2], favoreciendo de esta forma su utilización en puertos y obras expuestas a agua de mar, prolongando así la vida útil del concreto. Por otro lado, dentro de una productora de concreto se puede llegar a tener múltiples beneficios; por ejemplo, al remplazar el cemento se presenta una disminución en la emisión de  $\text{CO}_2$ . Con respecto a este último aspecto, es importante lograr reducciones debido a que se han llegado a niveles de emisión importantes; por ejemplo, la PBL Netherlands Environmental Assessment Agency publicó que 24 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  fueron emitidas en el 2011 con un incremento del 3% [3].

De esta forma, conociendo todos los beneficios en el concreto, el uso de las cenizas volantes en Norte América y Europa ha sido amplio en las últimas décadas. En el caso de Norte América, se creó el comité 232 de la

## **Julián Carrillo León**

Ingeniero Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, Magíster en Ingeniería Civil de La Universidad de los Andes y Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Civil y líder del Grupo de Investigación de Estructuras y Sísmica de la UMNG. En Colombia, es miembro de la Junta Directiva de la Acies y miembro de la AIS y la Alconpat. A nivel internacional es miembro de ACI, ASCE, EERI, SMIS y SMIE. Ha recibido el Premio al Mejor Artículo de Estudiantes de Doctorado por el EERI, Premio a la Mejor Tesis de Doctorado por la SMIS, Premio ECIciencia por la ECI, Premio José A. Cuevas por el CICM y Premio al Mérito Pedagógico e Investigativo por Redipe. En la UMNG ha sido reconocido con la Medalla al Mérito Académico, Premio al Profesor Distinguido del 2013 y Premio al Investigador Distinguido del 2012. Es autor de 12 libros de investigación, 3 capítulos de libro, 50 artículos en revistas indexadas, 3 reportes de investigación y 38 artículos en conferencias.

# Concretos con cenizas volantes provenientes de termoeléctricas



En Colombia y en muchos países del mundo la aplicación de cenizas volantes no ha sido amplia debido al desconocimiento no solo de los beneficios que este material puede llegar a tener, sino también de las posibles fuentes disponibles para su consecución. Así mismo, su uso no solo en mezclas ternarias sino también en binarias hace crucial el estudio presentado en este libro sobre la parametrización de comportamientos con el cemento y escoria bajo diferentes cuantías. Teniendo en cuenta todos los factores que afectan las mezclas, se define un patrón de comportamiento de la ceniza dentro de la mezcla, facilitando la estandarización de su uso en las mezclas que manejen los mismos materiales.

En este libro se presentan mezclas de concreto con ceniza volante tipo F, con el fin de buscar el potencial en cuanto a mejoras en el desempeño del diseño (asentamiento, manejabilidad, contenido de aire, resistencias). El estudio se desarrolla en dos fases: la primera fase incluye consideraciones físico-químicas de la ceniza, así como ensayos en estado fresco y endurecido de las mezclas de concreto; la segunda fase estudia con una mayor profundidad los diseños ideales a partir de las pruebas desarrolladas en la mezcla de concreto.

**Colección:** Ingeniería y salud en el trabajo

**Área:** Ingeniería civil

**ECOE**  
EDICIONES

