

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos



Impacto ambiental y económico del uso de cenizas volantes provenientes de termoeléctricas como material cementante suplementario en la industria concretera.

Rafael Guillermo Contreras Amaya

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

septiembre de 2024

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Impacto ambiental y económico del uso de cenizas volantes provenientes de termoeléctricas como material cementante suplementario en la industria concretera.

Rafael Guillermo Contreras Amaya

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)

Henry Alberto Rodríguez Guzmán
MSc. Gestión integrada de la calidad

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Septiembre de 2024

Contenido

Lista de tablas.....	6
Lista de figuras.....	7
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Introducción	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 Descripción del problema.....	14
1.1.1 Problema central	14
1.1.2 Antecedentes y causas.....	14
1.1.3 Contexto en la industria colombiana.....	15
1.1.4 Causas del problema	15
1.1.5 Consecuencias del problema.....	15
1.2 Pregunta de investigación.....	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Justificación de la investigación.....	17
1.4.1 Importancia para la comunidad científica.....	17
1.4.2 Relevancia para la industria de la construcción	18
1.4.3 Importancia para la institución educativa y la comunidad.....	18
2 MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1 Marco de antecedentes	19
2.1.1 Efectos de la adición de cenizas volantes en la resistencia mecánica del concreto	19
2.1.2 Hidratación del cemento en mezclas con cenizas volantes.....	22
2.1.3 Influencia del tipo de ceniza	22
2.1.4 Durabilidad y mitigación de la reactividad álcali-sílice	24
2.2 Marco teórico	26

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

2.2.1	Cemento Portland.....	26
2.2.2	Fabricación del cemento Portland.....	27
2.2.3	Agregados pétreos.....	28
2.2.4	Efecto de la forma de los agregados	29
2.2.5	Puzolanas	29
2.2.6	Cenizas volantes.....	30
2.3	Marco normativo	30
2.3.1	Norma técnica colombiana NTC 3493	30
2.3.2	Norma de construcción sismorresistente NSR10.....	31
3	METODOLOGÍA.....	32
3.1	Enfoque y alcance de la investigación	32
3.2	Población y muestra	32
3.2.1	Definición de la población	32
3.2.2	Cálculo y selección de la muestra.....	33
3.3	Instrumentos	35
3.3.1	Ensayos de resistencia a la compresión	35
3.3.2	Diarios de campo	36
3.3.3	Encuestas a profesionales del sector concretero	37
3.4	Descripción de procedimientos	37
3.4.1	Ensayos de resistencia a la compresión	37
3.4.2	Diarios de campo	38
3.4.3	Encuestas a profesionales del sector concretero	39
3.5	Análisis de información	40
3.5.1	Procesamiento y análisis de datos de ensayos de resistencia a compresión.	40
3.6	Consideraciones éticas	41
3.6.1	Análisis de consideraciones éticas	41
3.6.2	Acuerdo de confidencialidad y privacidad	41
4	HIPÓTESIS.....	42
4.1	Hipótesis Principal:	42
4.2	Variables.....	43
4.2.1	Variable(s) independiente(s).....	43

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

4.2.2	Variable(s) dependiente(s)	44
4.2.3	Relación entre variables	44
4.3	Planteamiento de hipótesis	44
5	RESULTADOS	45
5.1.1	Características de los materiales	45
5.1.2	Diseño de mezcla	46
5.1.3	Escalamiento del diseño.....	46
5.2	Codificación de datos	49
5.2.1	Análisis de datos	50
5.2.2	Observaciones por conjunto de datos	51
5.2.3	Análisis de tendencia	53
6	CONCLUSIONES	55
6.1	Cumplimiento de objetivos y pregunta de investigación	55
6.2	Pregunta de investigación.....	55
6.3	Evaluación de la hipótesis	56
6.4	Impacto en el campo de estudio	56
6.5	Nuevos temas de investigación	57
6.6	Conclusiones finales.....	58
	Referencias.....	59
	Anexos	62

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Requisitos para concreto sometido según clase de exposición</i>	31
Tabla 2. <i>Dosificación por metro cúbico para diseño de mezcla de concreto 21 MPa</i>	46
Tabla 3. <i>Humedad y absorción de los agregados</i>	46
Tabla 4. <i>Escalamiento del diseño de mezcla a 28 litros (mezcla testigo)</i>	47
Tabla 5. <i>Dosificación para 28 L de la mezcla 90/10</i>	47
Tabla 6. <i>Dosificación para 28 L de la mezcla 85/15</i>	48
Tabla 7. <i>Dosificación para 28 L de la mezcla 80/20</i>	48
Tabla 8. <i>Dosificación para 28 L de la mezcla 75/25</i>	49
Tabla 9. <i>Resultados de ensayos de resistencia a la compresión</i>	49
Tabla 10. <i>Resumen análisis de varianza de un factor</i>	51
Tabla 11. <i>Análisis de varianza</i>	51

Lista de figuras

Figura 1. <i>Fabricación de cemento por proceso húmedo (Neville, 2013)</i>	27
Figura 2. <i>Fabricación de cemento por proceso seco (Neville, 2013)</i>	28
Figura 3. <i>Curvas de evolución de resistencia a la compresión</i>	50
Figura 4. <i>Ensayo de asentamiento (NTC 396)</i>	62
Figura 5. <i>Ensayo de masa unitaria (NTC 1926)</i>	63
Figura 6. <i>Ensayo de contenido de aire (NTC 1032)</i>	64
Figura 7. <i>Elaboración de especímenes de concreto (NTC 550)</i>	65
Figura 8. <i>Certificado de calibración prensa hidráulica</i>	65
Figura 9. <i>Ensayos de resistencia a la compresión (NTC 673)</i>	66
Figura 10. <i>Cilindro ensayado</i>	67

Resumen

La construcción, crucial en el desarrollo humano, ha evolucionado junto con la ciencia y la tecnología, pero ha generado un significativo impacto ambiental debido al uso intensivo de cemento y acero, responsables del 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono (GCCA, 2023). Esta monografía aborda la problemática ambiental asociada con la producción de cemento y explora soluciones para mitigar este impacto.

En respuesta a la necesidad de reducir el consumo de cemento, se investigan alternativas como el uso de cenizas volantes, un residuo de la industria térmica. Las cenizas volantes tienen la capacidad de mejorar la resistencia y durabilidad del concreto, además de controlar problemas como la reactividad álcali-sílice, que puede debilitar las estructuras de hormigón. La producción anual de cenizas volantes supera los 2000 millones de toneladas, creando un desafío adicional en términos de gestión de residuos.

La investigación se centra en el aprovechamiento de estas cenizas como material cementante suplementario. Este enfoque no solo busca reducir la cantidad de cemento necesario, disminuyendo así las emisiones de CO₂, sino que también presenta beneficios económicos al reducir los costos de materias primas para los productores de concreto. Así, se promueve una solución que combina ventajas ambientales y económicas, contribuyendo a una construcción más sostenible.

Palabras clave: construcción sostenible, cemento, emisiones de CO₂, cenizas volantes, materiales cementantes suplementarios, impacto ambiental, reactividad álcali-sílice, residuos industriales, huella de carbono.

Abstract

Construction, crucial to human development, has evolved alongside science and technology. However, it has also generated a significant environmental impact due to the intensive use of cement and steel, which are responsible for 7% of global carbon dioxide emissions (GCCA, 2023). This monograph addresses the environmental issues associated with cement production and explores solutions to mitigate this impact.

In response to the need to reduce cement consumption, alternatives such as the use of fly ash, a byproduct of thermal industries, are investigated. Fly ash has the ability to enhance the strength and durability of concrete, as well as control issues like alkali-silica reactivity, which can weaken concrete structures. The annual production of fly ash exceeds 2000 million tons, creating an additional challenge in waste management.

The research focuses on utilizing fly ash as a supplementary cementitious material. This approach aims not only to reduce the amount of cement needed, thereby decreasing CO₂ emissions, but also to provide economic benefits by lowering raw material costs for concrete producers. Thus, it promotes a solution that combines environmental and economic advantages, contributing to more sustainable construction.

Keywords: sustainable construction, cement, CO₂ emissions, fly ash, supplementary cementitious materials, environmental impact, alkali-silica reactivity, industrial waste, carbon footprint.

Introducción

La construcción ha sido un pilar esencial en el desarrollo de las civilizaciones a lo largo de la historia, proporcionando avances significativos en términos sociales y económicos. A medida que ha evolucionado en paralelo con los avances en ciencia y tecnología, la construcción también ha intensificado su impacto ambiental, particularmente debido al uso extensivo de cemento y acero, dos de las industrias más contaminantes a nivel global. La industria cementera, en particular, es responsable del 7% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (GCCA, 2023), un gas de efecto invernadero clave en el cambio climático.

El problema de investigación central de este estudio es el elevado impacto ambiental asociado con la producción de cemento, impulsado por la necesidad creciente de cemento en el sector de la construcción. La pregunta de investigación que guía esta monografía es: ¿Qué impacto ambiental y económico generaría el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de hormigón premezclado de la industria concretera en Colombia?

Con el incremento de la producción de cenizas volantes, que superó los 2000 millones de toneladas en 2023 (Anish et al., 2023), surge la necesidad de explorar cómo estos residuos industriales pueden ser aprovechados para mitigar el impacto ambiental del cemento. La reutilización de cenizas volantes podría ofrecer una solución doble: reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento y disminuir los costos de materias primas para los productores de concreto.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el potencial de las cenizas volantes como material cementante suplementario para reducir la cantidad de cemento en la producción de concreto. Se pretende demostrar cómo este enfoque puede generar un impacto ambiental positivo y proporcionar beneficios económicos, contribuyendo a una construcción más sostenible.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

La revisión literaria se centra en estudios previos que han investigado la actividad puzolánica de diversos residuos industriales como el chamote, la escoria de alto horno y las cenizas volantes. Estos estudios han mostrado que las cenizas volantes pueden mejorar la resistencia y durabilidad del concreto y controlar la reactividad álcali-sílice que afecta negativamente a las estructuras de hormigón (Anish et al., 2023; Nagrockiene et al., 2018).

La investigación se basa en una combinación de análisis documental y experimentación. Se revisaron estudios existentes y se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño de concreto que incorpora cenizas volantes en comparación con el concreto convencional.

La incorporación de cenizas volantes en la mezcla de concreto mostró una reducción significativa en el uso de cemento, con mejoras en la resistencia y durabilidad del material. Además, este enfoque demostró ser eficaz en la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento y proporcionó una ventaja económica al disminuir los costos de materias primas. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de utilizar cenizas volantes como una solución sostenible en la industria de la construcción, contribuyendo tanto a la reducción del impacto ambiental como a la optimización de costos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la construcción ha sido partícipe del avance y desarrollo de todas las civilizaciones a lo largo de la historia. Las obras de desarrollo urbanístico contribuyen al mejoramiento en la calidad de vida de las personas, generan empleos y contribuyen al crecimiento económico: Carreteras, hospitales, aeropuertos, escuelas y viviendas, entre otros.

A nivel mundial, la construcción representa el 13% del PIB, consolidándose como uno de los principales mecanismos de generación de riquezas, atrayendo la inversión pública y privada, siendo a su vez una fuente importante de generación de empleos directos e indirectos.

En Colombia en el 2023, el sector construcción representó un 7,4% del PIB y aportó el 6,6% a la generación de empleos del país (DANE, 2023).

Teniendo en cuenta las dimensiones de esta industria y siendo conscientes de la problemática que enfrenta el mundo, referente al cambio climático, debemos considerar el impacto ambiental que genera.

La construcción involucra dos de las tres industrias más contaminantes del mundo: cemento y acero. Según la Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA), la industria cementera produce alrededor del 7% de las emisiones de dióxido de carbono, que ocupa la mayor proporción en la atmósfera entre los gases de efecto invernadero. En lo que respecta a la producción de cemento, se presentan tasas de generación cercanas a los 850kg de CO₂ por tonelada de cemento. Por este motivo, los productores de concreto premezclado deben encaminar sus esfuerzos en investigación y desarrollo para lograr una disminución en el consumo de cemento que permita mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y ayudar a frenar el cambio climático.

En este orden de ideas, la industria concretera, que es el centro de esta investigación, tiene un aporte significativo al fenómeno de cambio climático por ser el cemento una de las principales materias primas empleadas en la producción de concreto premezclado.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Por otro lado, completando el grupo de industrias más contaminantes, se encuentra el sector energético que es responsable del 25% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono generado por la quema de combustibles fósiles (carbón y derivados del petróleo). Para el 2023, en Colombia la matriz energética tuvo una capacidad de generación de 18,77 MW y estuvo conformada principalmente por energía hidráulica (66,8%) y energía térmica (30,5%) (CORFI colombiana, 2023). Las termoeléctricas se encuentran instaladas como una alternativa para la producción de energía cuando los niveles de los ríos son muy bajos para generación hidráulica, situación que se está presentando actualmente con el fenómeno del niño que cada año se prolonga respecto a épocas pasadas. En consecuencia, las plantas térmicas deben mantenerse encendidas, generando emisiones de CO₂ y un gran volumen de residuos sólidos producto de la combustión del carbón, llamados cenizas volantes.

Este subproducto ha sido estudiado desde mediados del siglo XX, logrando importantes hallazgos en cuanto su capacidad puzolánica: al entrar en contacto con el agua, formar estructuras cristalinas, generando productos de hidratación que se adhieren a la matriz pasta-agregado, aportando resistencia mecánica al concreto endurecido.

Teniendo en cuenta el potencial puzolánico de las cenizas volantes, se introduce la posibilidad de implementar este subproducto como una materia prima alternativa en la producción de concreto premezclado, contribuyendo a la mitigación de dos problemas ambientales: disminuir el consumo de cemento y, por ende, la contaminación que produce su producción, así como dar uso al volumen de cenizas generado por las termoeléctricas que son un problema ambiental (material particulado). Además, esta incursión generaría un beneficio económico para la compañía, puesto que las cenizas volantes tienen un costo inferior respecto al cemento, representando un ahorro en la producción.

Es el primer paso para aterrizar la investigación. Este enfoca la investigación. Contiene la descripción del problema, la pregunta de investigación, los objetivos de investigación y la justificación de la investigación.

1.1 Descripción del problema

La industria de la construcción ha sido un motor clave en el avance de las civilizaciones, impulsando el desarrollo de infraestructura esencial como carreteras, hospitales, aeropuertos, escuelas y viviendas. Esta actividad, que representa el 13% del Producto Interno Bruto (PIB) a nivel mundial, es fundamental para el crecimiento económico y la creación de empleo tanto directo como indirecto (GCC, 2023). En Colombia, el sector construcción aportó el 7,4% del PIB y contribuyó con el 6,6% a la generación de empleo en 2023 (DANE, 2023). No obstante, a pesar de sus beneficios económicos y sociales, la construcción enfrenta serios problemas ambientales, principalmente debido al uso extensivo de cemento y acero, dos de las industrias más contaminantes del mundo.

1.1.1 Problema central

El problema central de esta investigación es el impacto ambiental negativo de la industria cementera, que es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂). La producción de cemento es una de las principales fuentes de estas emisiones, con tasas cercanas a los 850 kg de CO₂ por tonelada de cemento (GCCA, 2023). Estas emisiones contribuyen significativamente al cambio climático, un fenómeno que afecta a todo el planeta y requiere acciones urgentes para mitigar sus efectos.

1.1.2 Antecedentes y causas

Desde mediados del siglo XX, se han identificado varias fuentes de contaminación relacionadas con la producción de cemento. La industria cementera utiliza grandes cantidades de energía y materias primas, principalmente caliza y arcilla, en procesos que liberan grandes volúmenes de CO₂. La quema de combustibles fósiles en la producción de cemento también contribuye a estas emisiones. Este impacto se ve exacerbado por el hecho de que la construcción en general y la producción de cemento, en particular, son esenciales para el desarrollo urbanístico, lo que lleva a una alta demanda constante de cemento.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Además de la industria cementera, el sector energético es otra fuente importante de emisiones de CO₂, generando el 25% de las emisiones globales debido a la quema de combustibles fósiles como carbón y derivados del petróleo (GCC, 2023). En Colombia, las plantas termoeléctricas, que constituyen una parte significativa de la matriz energética, generan grandes volúmenes de cenizas volantes como residuo de la combustión del carbón. En 2023, la capacidad de generación de energía térmica en Colombia fue del 30,5%, mientras que la energía hidráulica representó el 66,8% (CORFI Colombiana, 2023).

1.1.3 Contexto en la industria colombiana

En este contexto, la investigación se centra en la posibilidad de utilizar cenizas volantes como un material cementante suplementario en la producción de concreto premezclado. Estas cenizas, un subproducto de la quema de carbón en plantas termoeléctricas, tienen un potencial puzolánico significativo. Desde mediados del siglo XX, se ha demostrado que las cenizas volantes pueden mejorar la resistencia y durabilidad del concreto, además de controlar la reactividad álcali-sílice, que puede debilitar las estructuras de hormigón (Nagrockiene et al., 2018).

1.1.4 Causas del problema

El uso intensivo de cemento es impulsado por la alta demanda de infraestructura en crecimiento, que requiere grandes volúmenes de este material. Las plantas termoeléctricas, al utilizar carbón para generar electricidad, producen cenizas volantes que, si no se gestionan adecuadamente, contribuyen a problemas ambientales adicionales. La falta de alternativas efectivas para el manejo de estas cenizas y su disposición adecuada agrava el problema.

1.1.5 Consecuencias del problema

El problema de la alta emisión de CO₂ por la producción de cemento tiene múltiples consecuencias. En primer lugar, contribuye al cambio climático, que trae consigo fenómenos

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

meteorológicos extremos, elevación del nivel del mar y alteraciones en los ecosistemas. Además, la acumulación de cenizas volantes no utilizadas genera problemas de gestión de residuos y contaminación del aire y agua debido al material particulado.

Para las compañías de construcción, la alta dependencia del cemento implica costos elevados en materias primas, mientras que el uso de cenizas volantes podría reducir estos costos significativamente. La implementación de esta alternativa no solo podría disminuir el impacto ambiental asociado con la producción de cemento, sino también ofrecer un ahorro económico al utilizar un subproducto de la industria energética como material suplementario.

1.2 Pregunta de investigación

¿Qué impacto ambiental y económico generaría el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de hormigón premezclado de la industria concretera en Colombia?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental y económico del uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de concreto premezclado en la industria de la construcción en Colombia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar el impacto ambiental que causa el volumen de cenizas volantes producido como residuo en la generación de energía a través de plantas termoeléctricas en Colombia.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- Estimar el aporte en emisiones de gases de efecto invernadero causado por el alto consumo de cemento debido a la gran demanda de hormigón premezclado por parte de la industria de la construcción.
- Evaluar el beneficio económico que obtendría la industria concretera con la inclusión de cenizas volantes como material cementante suplementario dentro de la mezcla tradicional de hormigón.

1.4 Justificación de la investigación

La investigación sobre el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de concreto premezclado es de crucial importancia para la comunidad científica, la industria de la construcción, y para el bienestar general de la sociedad. Este estudio no solo aborda un problema ambiental significativo, sino que también ofrece beneficios económicos sustanciales y aporta al desarrollo académico en el campo de la ingeniería y la sostenibilidad.

1.4.1 Importancia para la comunidad científica

El impacto ambiental de la construcción es un tema ampliamente reconocido en la literatura científica. La industria de la construcción, particularmente a través del uso intensivo de cemento, contribuye significativamente a las emisiones globales de gases de efecto invernadero. La producción de cemento es responsable del 7% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (GCCA, 2023), y en Colombia, donde el consumo de cemento es alto, el impacto es aún más pronunciado. En 2023, la producción de cemento en Colombia emitió aproximadamente 2,2 millones de toneladas de CO₂, un dato alarmante que subraya la necesidad urgente de alternativas sostenibles (DANE, 2023).

Esta investigación ofrece una contribución valiosa al abordar directamente esta problemática. Al explorar el potencial de las cenizas volantes, un residuo de la industria termoeléctrica, como material cementante suplementario, se busca proporcionar una solución que reduzca la dependencia del cemento y, en consecuencia, las emisiones de CO₂. Este enfoque no

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

solo tiene el potencial de disminuir el impacto ambiental de la industria de la construcción, sino que también abre nuevas vías para la reutilización de residuos industriales, promoviendo la economía circular.

1.4.2 Relevancia para la industria de la construcción

La industria de la construcción en Colombia y en otras partes del mundo enfrenta un desafío significativo relacionado con la sostenibilidad. En 2023, el sector construyó más de 7,9 millones de metros cúbicos de concreto premezclado, consumiendo cerca de 2,8 millones de toneladas de cemento (DANE, 2023). El cemento, siendo uno de los componentes más costosos y ambientalmente dañinos del concreto, representa una carga económica y ecológica considerable para las empresas constructoras.

La incorporación de cenizas volantes en la mezcla de concreto puede ofrecer una alternativa económica y ambientalmente viable. Este subproducto, generado en grandes volúmenes por las plantas termoeléctricas, tiene la capacidad de reducir el consumo de cemento, lo cual puede llevar a una disminución significativa en los costos de producción. Además, el uso de cenizas volantes puede contribuir a la mitigación de problemas ambientales al reducir la necesidad de extraer y procesar cemento, así como al aprovechar un residuo que de otro modo sería un problema de gestión de desechos.

1.4.3 Importancia para la institución educativa y la comunidad

Para la UNIMINUTO, esta investigación representa una oportunidad para fortalecer su perfil académico y de investigación en áreas clave como la ingeniería ambiental y la sostenibilidad. La participación en estudios de esta índole no solo enriquece el conocimiento y las competencias de los estudiantes, sino que también posiciona a la institución como un líder en la búsqueda de soluciones innovadoras para problemas globales.

Los estudiantes involucrados en esta investigación ganan una valiosa experiencia práctica y teórica en el campo de la sostenibilidad y la ingeniería de materiales. Este tipo de investigación

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

permite a los estudiantes aplicar conceptos académicos a problemas reales, promoviendo su desarrollo profesional y preparándolos para desafíos futuros en sus carreras.

El desarrollo de este proyecto también impacta positivamente en la especialización y los programas de posgrado de la institución. Al contribuir con conocimientos innovadores y aplicados en áreas de gran relevancia como la ingeniería de materiales y la sostenibilidad, se fortalece la oferta académica y se promueven nuevas áreas de investigación y especialización. Esto no solo mejora la calidad educativa, sino que también atrae a futuros estudiantes e investigadores interesados en estos campos de estudio.

La comunidad, por su parte, se beneficia al ver una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y una disminución en la generación de residuos industriales. Además, la propuesta de utilizar cenizas volantes podría traducirse en una reducción en los costos de construcción, lo que potencialmente puede hacer que los proyectos de infraestructura sean más accesibles y sostenibles.

2 MARCO DE REFERENCIA

El presente marco de referencia proporciona el fundamento teórico necesario para entender el impacto y la relevancia del problema de investigación relacionado con el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de concreto premezclado; resume la información teórica clave proveniente de fuentes académicas y científicas, y establece el contexto necesario para abordar la problemática en profundidad.

2.1 Marco de antecedentes

2.1.1 Efectos de la adición de cenizas volantes en la resistencia mecánica del concreto

Montgomery et al. (1981) realizaron un estudio para determinar el mecanismo de influencia de la adición de cenizas volantes en la resistencia mecánica del concreto. El estudio demostró que a edades tempranas el efecto es mínimo, pero a edades superiores a 28 días el

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

incremento en la resistencia a la compresión es notorio. Esto se debe al efecto puzolánico de la ceniza volante.

Ho et. al (1985) evaluaron la factibilidad en mezclas de con ceniza volante y cemento en varias proporciones utilizando tres fuentes distintas de cemento y ceniza. Define entonces que:

La eficacia de la ceniza volante como la cuantía de cemento que se puede sustituir por adición sin alterar las propiedades del concreto. El comportamiento encontrado sugiere una sinergia entre el cemento y la ceniza utilizada pues la resistencia a la compresión de las muestras varía de acuerdo a la combinación de cementantes y aun utilizando el mismo tipo de ceniza el resultado de resistencias depende del tipo de cemento usado. Concluyen en que un curado prolongado puede aumentar en gran medida la eficacia de las cenizas volantes en su resistencia a la compresión y que este no es necesariamente igual a su efectividad de resistencia a la carbonatación.

Lam et. al. (2000) estudiaron concretos con cenizas volantes tipo F en proporciones de 0%, 25%, 45% de la masa total de materiales cementosos. Estudiaron la resistencia a la compresión, calor de hidratación, difusividad de cloruros, grado de hidratación y estructuras de poros de cenizas volantes. Obtuvieron un concreto con menor calor de hidratación y difusividad de cloruro en comparación con el concreto de control, además de una resistencia a la compresión de 80 MPa a los 28 días con un contenido de ceniza volante de 45%.

Siddique (2002) investigó el efecto del remplazo de cemento con altos volúmenes de ceniza volante clase F y las propiedades del concreto, reemplazando el cemento por porcentajes de ceniza del 40, 45 y 50% en masa. Los resultados arrojaron que, al sustituir la ceniza volante en el concreto, redujo la resistencia a la compresión, pero hubo una mejora significativa más allá de los 28 días. Reporta que la resistencia a los 28 días es suficiente para usar en concreto reforzado.

Hernández (2008) menciona que la ceniza volante puede ser utilizada en la mezcla de concreto de un 15 a 20% del volumen total del cemento, lo cual aumenta notablemente la resistencia del material.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Valdéz et. al. (2007) evaluaron propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y abrasión, propiedades del concreto fresco (revenimiento, consistencia, contenido de aire, tiempo de fraguado) de concretos con altos contenidos de ceniza volante. Determinaron que:

las bajas relaciones a/c que obtuvieron gracias a la ceniza volante, les permitió disminuir el porcentaje de retracción por secado pero la resistencia a la abrasión presentó una ganancia. En cuanto a la resistencia a la compresión superando a los concretos comerciales de 25MPa. Confirman el beneficio de la ceniza volante cuando es agregada a los concretos, tanto para la resistencia mecánica y en lo económico.

Pati et. al. (2012) reportan que la resistencia del concreto disminuye con el aumento del porcentaje de reemplazo del cemento con cenizas volantes a los 28 días. Pero, a los 90 días, se obtuvo la resistencia máxima para un 10% de adición de cenizas volantes.

Uysal et. al. (2012) investigaron el efecto del uso de la ceniza volante clase C y F como reemplazo parcial del cemento en porcentajes del 0, 10, 15,17, 20, 25.5 y 34%. Comprobaron que:

El mejor resultado a 90 días de resistencia a la compresión fue con un 20% de ceniza volante como sustituto parcial de cemento portland alcanzando valores de 75.06 MPa con ceniza tipo F y 73.84 MPa con ceniza tipo C. Para la prueba de permeabilidad al ión cloruro el valor más bajo de penetración con 131 Coulombios fue observada en concretos con un 34% de ceniza volante tipo F y de 150 Coulombios en concretos con un 25.5% de ceniza tipo C. La sortividad de los concretos decreció con el incremento de la ceniza volante, esto fue observado en concretos con un 34% de ceniza tipo F a los 90 días asociado a la reacción puzolánica.

Wankhede et. al. (2014) notaron que concreto con 10% y 20% de reemplazo de cemento con cenizas volantes muestra una buena resistencia a la compresión durante 28 días respecto al concreto normal con una relación de 0.35 a/c , pero en el caso del 30% de reemplazo de cemento con cenizas volantes, la resistencia a la compresión final del concreto disminuye.

2.1.2 Hidratación del cemento en mezclas con cenizas volantes

Fajun et. al. (1985) realizaron un estudio comparativo entre dos tipos de ceniza volante (tipo C y F) y evaluaron los efectos de las cenizas volantes durante la hidratación temprana. Concluyeron que:

Las cenizas volantes de clase C y clase F no solo retrasaron la hidratación del C3S sino también la del C3A en el cemento tipo I. Reportan que existe un efecto primario de disminución del calor liberado debido a la adición de cenizas volantes en la mezcla de cemento, esto como efecto de dilución debido a la disipación parcial de un material menos reactivo. Las cenizas volantes con alto contenido de calcio tipo C resultaron más reactivas, así una gran cantidad de aluminio está disponible para la formación de la fase C4AF en la mezcla de cemento de cenizas volantes de clase C, en relación con la mezcla de cenizas volantes de clase F.

Thaulow (1985) estudió el proceso de hidratación de mezclas de cemento con ceniza volante. Concluyeron que la mayoría de las partículas de ceniza volante de mayor tamaño no se hidratan; sin embargo, cumplen una función importante como “microagregados” al incrementar la densidad de la mezcla. Las partículas de las cenizas volantes más finas se incorporan en la matriz de partículas hidratadas de cemento, formando parte de la pasta.

2.1.3 Influencia del tipo de ceniza

Mehta (1985) realizó un estudio de caracterización de propiedades físicas y químicas de la ceniza volante para conocer cuales influían de manera significativa en el comportamiento de las mezclas con cemento portland y ceniza. Menciona que:

La ceniza volante producida en centrales térmicas generalmente es baja en carbono <5%, altas en silicio >75% y tienen una distribución de tamaño de partícula fina de >40% por debajo de 10 μm y <20% arriba de 45 μm , características adecuadas para su uso como sustituto de cemento en mezclas de concreto. Menciona que la mayoría de elementos químicos en la ceniza volante parece no tener efecto sobre su reactividad, excepto el

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

contenido de calcio, en donde a mayor contenido de calcio la reactividad es mayor, esto atribuido a la posible presencia de compuestos cristalinos reactivos como el C3A (Aluminato de calcio). Menciona que cenizas con contenido normal de carbono, silicio y calcio, la distribución del tamaño de partícula es un parámetro importante en la reactividad de la ceniza volante. Encontró que la reactividad es directamente proporcional al tamaño de partícula $<10\ \mu\text{m}$ e inversamente a tamaños de partícula de $>45\ \mu\text{m}$.

Ravina et. al. (1986) estudiaron el efecto de reemplazar el 35% y 50% del cemento por ceniza volante (clase F y C) en la trabajabilidad, el consumo de agua y el tiempo de fraguado. Determinaron que:

La trabajabilidad de las mezclas con ceniza volante fue mejor respecto a las muestras control (sin ceniza volante), el agua requerida para obtener un revenimiento de diseño de 5 cm en todas las mezclas se redujo en un 5 a 10%. La tasa de exudación en las mezclas de concreto con ceniza volante ligeramente mayor a igual a la muestra de control dependiendo del tipo de ceniza y proporciones en la mezcla. Respecto al tiempo de fraguado, este se retrasó en ambos casos de mezclas con ceniza volante (Tipo C y F). El efecto de la ceniza volante en el tiempo de fraguado puede ser tanto químico como físico. Químicamente las cenizas volantes pueden afectar el proceso de hidratación del cemento o entre estas reaccionar y físicamente cuando hay más partículas finas de ceniza, incluso si no reaccionan, pueden servir como núcleos para el crecimiento y acumulación de los productos de hidratación del cemento.

Argiz et.al. (2012) describen que:

La ceniza de carboneras tiene un contenido de CaO superior en la ceniza volante (5,0%) que favorecer en la reacción puzolánica de la sílice de la ceniza con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado en la hidratación del cemento portland común. Por otro lado, la reducida pérdida por calcinación de la ceniza volante de Carboneras (3,6%) tiene influencia en la propiedad de durabilidad, es decir, una buena resistencia en ciclos de hielo y deshielo, Como aumenta la superficie específica aumenta la actividad puzolana además de atribuir un cierto efecto de relleno. Al aumentar el porcentaje de sustitución del material cementicio disminuye la porosidad capilar, la porosidad disminuye con la edad de curado

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

en forma general. La resistencia no se ve reflejada en instancia con la sustitución de CV ya que se tiene que esperar que esta reaccione con los silicatos cálcicos para primeramente formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Los resultados indicaron que ambas se comportaron de forma similar, aunque en la resistencia de la ceniza de fondo en ligeramente superior.

2.1.4 Durabilidad y mitigación de la reactividad álcali-sílice

Santiago (1988) reporta que la ceniza volante está compuesta de partículas de tamaños variables entre 1 y 150 μm . La incorporación de CV al concreto reduce el costo y mejora algunas de sus propiedades como trabajabilidad, impermeabilidad y su resistencia al ataque químico. Menciona que:

Las normas limitan la finura para su aplicación, estableciendo un valor máximo del retenido en el tamiz de 45 μm . La UNE limita al 40%, la británica en 12.5% y la americana a un 34%. En el caso de la norma española se limita a un 15 % del máximo retenido en un tamiz de 90 μm . Al incorporar CV como sustituto de cemento, la cantidad de ceniza volante que sustituya al cemento debe oscilar entre el 15 y 35% y las resistencias mecánicas a corto plazo son inferiores a las de un concreto sin cenizas con igual cantidad de producto cementante, pero a largo plazo estas pueden superar a la de estructuras fabricadas sin cenizas. La permeabilidad disminuye cuando se incorporan cenizas y la resistencia a sulfatos es mejorada.

Malhotra (1990) evaluó los aspectos de durabilidad en concretos con sustitución parcial de ceniza volante de un 54% a 58% del total de la masa de material cementante. El cemento portland empleado fue del tipo I y dos tipos de ceniza a las que designaron L y S. Las probetas fueron expuestas a ciclos repetidos de congelado y deshielo. Determinaron que:

Los valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) resultaron de 4800 m/s para concretos con ceniza S y 4735 m/s para concretos con ceniza tipo L. En la prueba de resistencia a la compresión reporta valores de 39.7 MPa para la ceniza tipo L y 41.2 MPa para la ceniza tipo S a 28 días. En la prueba de permeabilidad al ión cloruro, a 91 días se obtuvo baja permeabilidad con resultados del intervalo de 197 a 973 Culombios. Este

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

autor menciona que las reacciones álcali-agregado en el concreto pueden ser controladas usando ceniza volante en un rango de 30 a 40% además de disminuir el calor de hidratación y el contenido de cemento en las mezclas de concreto.

Montemor et. al. (2000) reporta que el uso de cenizas volantes en la sustitución parcial de cemento conduce a una mayor resistividad del concreto. Este efecto fue cuantificado tanto por inmersión completa como parcial. Para las condiciones de inmersión parcial en solución de cloruro de sodio, un reemplazo del 30% del cemento por cenizas volantes ocasionó un aumento significativo del tiempo de inducción y una reducción de la velocidad de corrosión en un orden de magnitud.

Sahmaran et. al (2005) estudiaron los efectos del reemplazo de ceniza volante en las propiedades frescas y endurecidas en concretos autocompactantes que incorporaron diferentes tipos de fibras de acero. Reportan que la incorporación de ceniza volante redujo el requerimiento de agua en la mezcla, el uso de grandes cantidades de ceniza volante aumentó las características de trabajabilidad, aunque el uso de ceniza volante causó pérdidas significativas de resistencia en las mezclas de concreto.

Vásquez (2007) estudió el desempeño de la ceniza volante como material cementante complementario en concretos con cemento portland. Observó que aun cuando utilizó las mismas cantidades de agua y aditivos, la ceniza volante no mejoró la trabajabilidad del concreto

Molina (2008) estudió la influencia de la ceniza volante empleando porcentajes del 15 y 35% como sustituto parcial de cemento portland. Los resultados indican que:

El uso de la ceniza volante retarda la difusión de dióxido de carbono (CO_2) en el concreto a los 28 y 56 días debido al contenido libre de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$. En la prueba de penetración del ion cloruro, observaron que al aumentar el volumen de la ceniza volante disminuye la penetración de este ion debido a la reducción de porosidad producidas por la adición de la ceniza volante. En cuanto a la resistencia a la compresión indicaron que el aumento de cenizas del 15% al 35% no modifica significativamente el comportamiento mecánico del material.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Olague et. al. (2011) mencionan que el uso de la ceniza volante en porcentaje del 25% inhibe el progreso de la reacción álcali sílice (RAS).

Escobar (2012) evaluó el efecto de la densificación de la matriz cementante mediante el empleo de una ceniza volante en el proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por efecto de la corrosión del acero de refuerzo. Reporta que:

Al sustituir cemento portland por ceniza volante, las propiedades de los concretos disminuyen ligeramente, sin embargo, las propiedades físicas mejoran. En el caso de la porosidad, el uso de la ceniza volante provoca una disminución, así mismo se logra incrementar la resistencia a la penetración de los iones cloro. Debido a la densificación de la matriz cementante se requirió más tiempo para activar el acero de refuerzo y disminuyó la rapidez de la degradación del acero (velocidad de corrosión), lo cual también se debe al cambio en la composición química de la solución de poro que reduce la difusión de agentes agresivos y limita la disponibilidad de oxígeno. Aunque el efecto de la CV en relación con la velocidad de corrosión se observa con periodos de curado largos.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Cemento Portland

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes.

Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales, cementos portland y cementos de alta alúmina. (Neville, 2013).

2.2.2 Fabricación del cemento Portland

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura de aproximadamente 1450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clinker. El clinker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, después se adiciona un poco de yeso, y el producto resultante es el cemento portland comercial que tanto se usa en todo el mundo. La mezcla y la trituración de las materias primas pueden efectuarse tanto en condiciones húmedas como secas; de aquí provienen los nombres de proceso húmedo o seco. En la actualidad, el método de fabricación depende también de la dureza de la materia prima empleada y de su contenido de humedad. (Neville, 2013).

Figura 1. Fabricación de cemento por proceso húmedo (Neville, 2013)

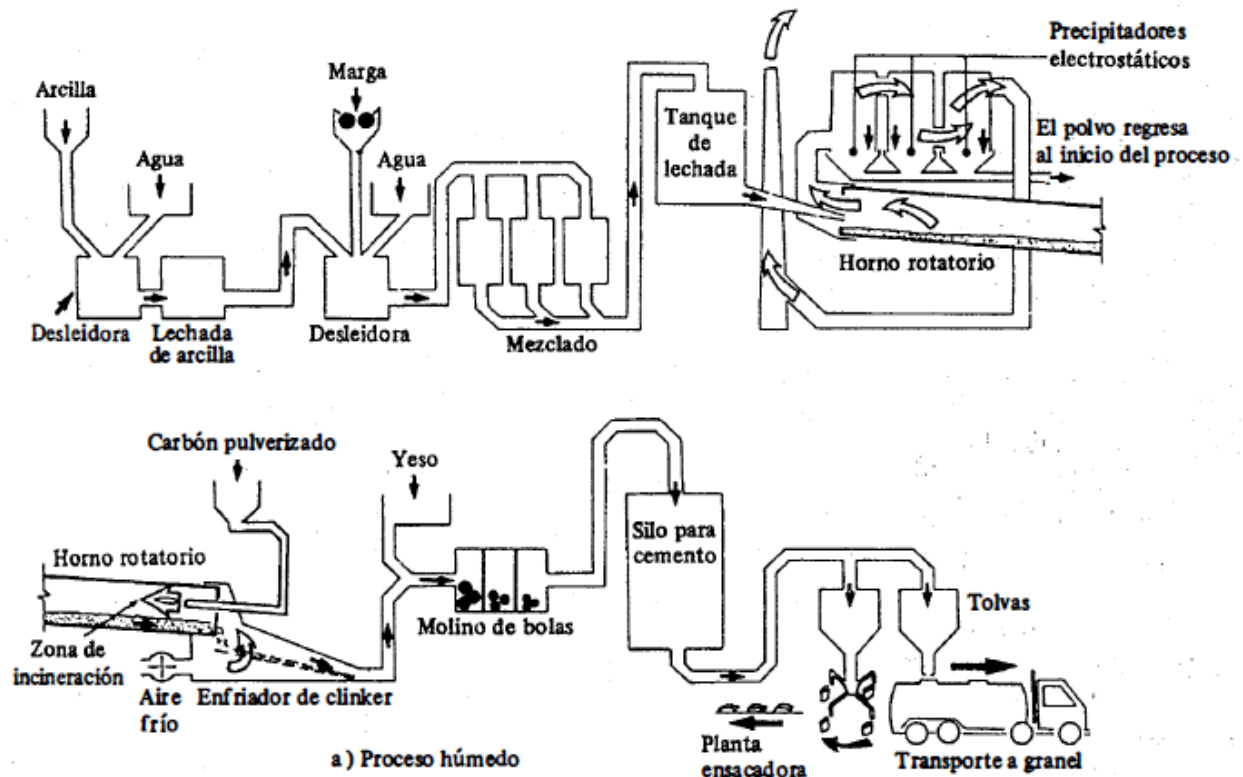
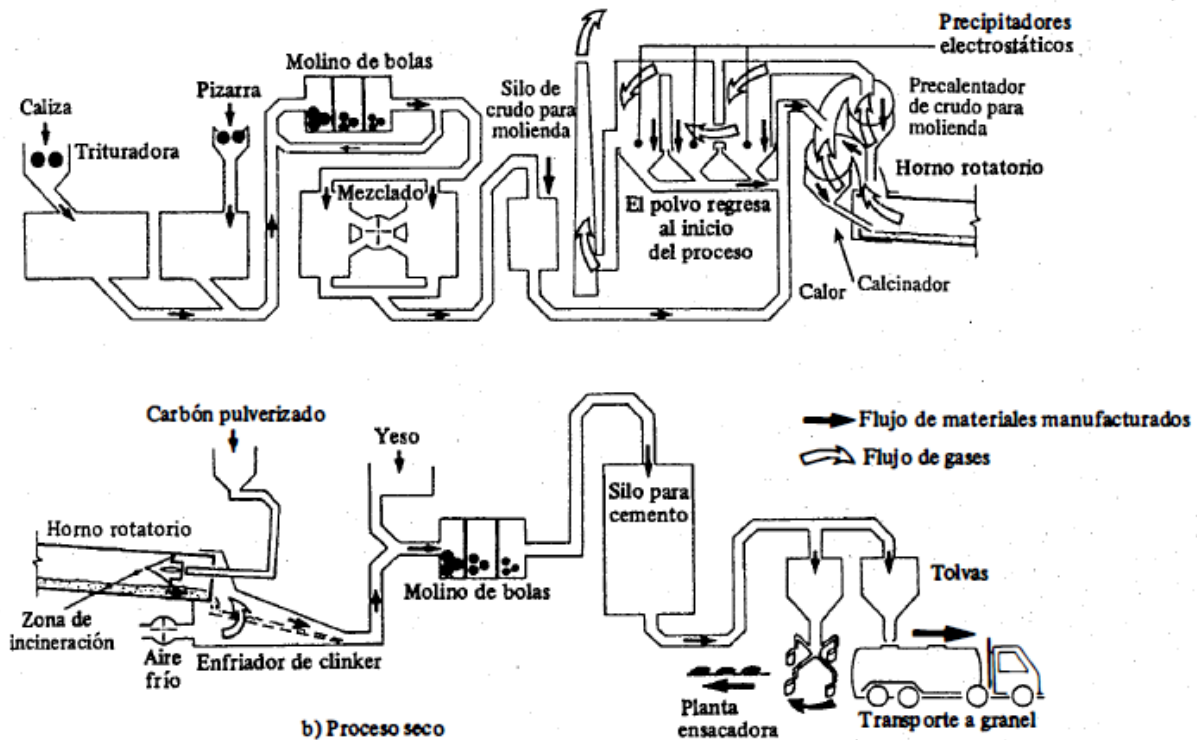


Figura 2. Fabricación de cemento por proceso seco (Neville, 2013)



2.2.3 Agregados pétreos

Los agregados pétreos son componentes fundamentales del concreto hidráulico, del concreto asfáltico y de las bases granulares. Sus características afectan no solo las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido sino también el costo del mismo. Los agregados conforman entre el 70% y el 80% del volumen del concreto, razón por la cual es importante conocer sus propiedades y la influencia de las mismas en las propiedades del concreto para optimizar no solo su uso y explotación, sino también el diseño de mezclas de concreto. Las características de los agregados en cuanto a su forma, textura y gradación influyen en la manejabilidad, en el acabado, en la exudación y en la segregación del concreto fresco y afectan la resistencia, la rigidez, la retracción, la densidad, la permeabilidad y durabilidad del concreto en estado sólido (Quiroga, 2003).

2.2.4 Efecto de la forma de los agregados

Para lograr una mezcla de concreto óptima se requieren entre otras condiciones que la compacidad de la mezcla de agregados sea la máxima posible de forma que la pasta de cemento requerida para la pega de los agregados sea la menor posible.

Igualmente se requiere que sus componentes satisfagan características que permitan que la mezcla de concreto sea durable y cumpla con los requisitos de manejabilidad y resistencia establecidos durante el diseño. La estimación de la compacidad de una mezcla granular es un problema fundamental para el manejo y conocimiento del concreto y depende de 3 parámetros fundamentales: tamaño y distribución de los granos, forma de los granos (morfología y textura) y método de compactación de la mezcla de concreto. (Johansen et. al, 1991).

A mayor contenido de vacíos el concreto requiere más pasta de cemento. Se ha encontrado que pueden esperarse ahorros en la pasta de cemento de alrededor de un 4 a 5% cuando se utiliza agregado cúbico en vez de agregado alargado y aplanado. Así mismo, como la forma de las partículas afecta la compacidad de la mezcla de agregado, esta tiene una alta incidencia en la demanda de pasta de cemento y por lo tanto en los costos del concreto, y afecta también la manejabilidad y las propiedades mecánicas concreto. Algunos estudios han sido desarrollados, para estimar la influencia de la forma en el comportamiento del concreto. (Hudson, 1999).

2.2.5 Puzolanas

La puzolana es un material silíceo o silíceo y aluminoso el cual, en sí mismo, posee poco o ningún de valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Es esencial esté en un estado finamente dividido pues es solamente entonces que la sílice se puede combinar con hidróxido de calcio (producido por el cemento portland que se hidrata) en presencia del agua para formar silicatos de

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

calcio estables, los cuales tienen propiedades cementantes. Debemos observar que la sílice ha de ser amorfa, o sea, vidriosa, porque la sílice cristalina tiene poca reactividad. (Neville, 2013).

2.2.6 Cenizas volantes

La ceniza volante también conocida como ceniza del combustible pulverizado, es la ceniza precipitada electrostáticamente o mecánicamente a partir de los gases de escape de las centrales de energía con combustión de carbón; es la puzolana artificial más común. Las partículas de ceniza volante son esféricas (lo cual es ventajoso desde el punto de vista del requisito de agua) y tienen una finura muy alta: las partículas, en su inmensa parte, tienen un diámetro entre menos de $1\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$ y la superficie específica de la ceniza volante es usualmente entre 250 y 600 m^2/kg , usando el método de Blaine. La alta superficie específica de la ceniza volante significa que el material está fácilmente disponible para reacción con hidróxido de calcio. (Neville, 2013).

2.3 Marco normativo

2.3.1 Norma técnica colombiana NTC 3493

Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland; Esta norma establece la utilización de cenizas volantes o puzolanas naturales, calcinadas o crudas, como aditivos minerales para concreto, donde sea deseable la acción cementante o puzolánica y/o donde puedan considerarse apropiadas atribuidas a aditivos minerales finos.

Clasificación

Clase N

Puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumplen con los requisitos indicados en esta norma, aplicables a puzolanas como: algunas tierras diatomáceas; pedernales y esquistos opalinos, tobas y cenizas volcánicas o piedra pómez, cualquiera de las cuales pudo haber sido o

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

no procesada por calcinación; así como varios materiales que requieren de este proceso para inducirles propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y esquistos.

Clase F

Cenizas volantes normalmente producidas en la quema del carbón antracítico o bituminoso, que cumpla con los requisitos aplicables para esta clase, especificados en esta norma. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.

Clase C

Cenizas volantes normalmente producidas a partir de carbón lignítico o sub bituminoso, que cumple con los requisitos aplicables de esta clase, especificados en esta norma. Esta clase de cenizas volantes, además de poseer propiedades puzolánicas, tienen algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas volantes de la clase C pueden tener contenidos de cal, mayores que el 10 %.

2.3.2 Norma de construcción sismorresistente NSR10

Capítulo C-4: Requisitos de durabilidad

Este capítulo menciona las proporciones máximas de ceniza y otros materiales cementantes suplementarios en la mezcla de concreto, para los diferentes grados de exposición a los cuales puede estar expuesto el concreto.

Tabla 1. *Requisitos para concreto sometido según clase de exposición*

Materiales cementantes	Porcentaje máximo sobre el total de materiales cementantes en peso*
Cenizas volantes u otras puzolanas que cumplen NTC 3493 (ASTM C618)	25
Escoria que cumple NTC 4018 (ASTM C989)	50
Humo de sílice que cumple NTC 4637 (ASTM C1240)	10
Total de cenizas volantes u otras puzolanas, escoria y humo de sílice	50+
Total de cenizas volantes u otras puzolanas y humo de sílice	35+

Nota: Tomado de NSR 10 capítulo C4.3, p. 338.

3 METODOLOGÍA

3.1 Enfoque y alcance de la investigación

Esta investigación adopta un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para abordar de manera integral el problema planteado. El enfoque cualitativo se empleará en la etapa exploratoria, donde se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario y su impacto ambiental en la industria concretera. Este análisis permitirá comprender las características y efectos del problema a partir de datos y estudios previos, estableciendo una base teórica sólida para la investigación. Por otro lado, el enfoque cuantitativo se aplicará en la fase experimental para obtener datos numéricos precisos sobre la eficiencia de las mezclas de concreto con cenizas volantes. Se llevarán a cabo pruebas de resistencia y durabilidad para cuantificar el impacto de diferentes proporciones de cenizas volantes en la mezcla de concreto, así como un análisis económico para evaluar los beneficios y costos asociados. Este enfoque mixto permite una comprensión integral del problema al combinar la riqueza de información cualitativa con la precisión y objetividad de los datos cuantitativos, facilitando una evaluación exhaustiva del impacto ambiental y económico de la sustitución de cemento por cenizas volantes en la producción de concreto premezclado.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Definición de la población

La población objeto de estudio en esta investigación está constituida por los diseños de mezcla de concreto tradicional que se someterán a pruebas de sustitución de cemento por cenizas volantes en distintas proporciones. Esta población se define específicamente como los lotes de

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

concreto premezclado elaborados con agregados aluviales provenientes del departamento del Atlántico, Colombia.

Los diseños de mezcla en cuestión abarcan una variedad de formulaciones estándar de concreto, a las que se les aplicarán modificaciones para integrar cenizas volantes en lugar de una fracción del cemento portland, con el fin de evaluar sus efectos en las propiedades mecánicas y económicas del concreto.

La selección de los diseños de mezcla se basará en fórmulas convencionales de concreto utilizadas en la industria, garantizando que los resultados obtenidos sean representativos y aplicables a la práctica común en la construcción. La variabilidad en las proporciones de sustitución y el uso de agregados locales permiten un análisis específico de cómo estas modificaciones impactan en las propiedades del concreto y en la viabilidad económica del uso de cenizas volantes como material cementante suplementario. La investigación se centrará en evaluar estas mezclas en términos de resistencia, durabilidad y costos, proporcionando una visión detallada del potencial de las cenizas volantes para mejorar la sostenibilidad de la industria del concreto en la región.

3.2.2 Cálculo y selección de la muestra

3.2.2.1 Tipo de muestreo

En esta investigación se empleará un muestreo no probabilístico de tipo conveniencia, dado que el objetivo es evaluar la resistencia mecánica de mezclas de concreto con diferentes proporciones de cenizas volantes. Este enfoque es adecuado porque permite seleccionar las mezclas de concreto y sus muestras basadas en su disponibilidad y relevancia para el estudio, en lugar de seleccionar aleatoriamente de una población más amplia.

3.2.2.2 Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra, es necesario calcular el número de mezclas a preparar y probar para asegurar la validez y fiabilidad de los resultados. En este caso, el cálculo del tamaño de muestra se basa en el número de proporciones de mezcla y las réplicas necesarias para cada proporción.

Dado que la investigación se centrará en cinco proporciones de mezcla (90/10, 85/15, 80/20, 75/25, y 100% cemento como mezcla testigo) y se realizarán pruebas de resistencia a compresión en tres momentos diferentes (3, 7 y 28 días), cada proporción debe ser probada con réplica para obtener resultados representativos y precisos.

Para un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, se recomienda realizar al menos 2 réplicas por cada proporción. Este enfoque asegura que los resultados reflejen de manera adecuada la variabilidad natural en los ensayos y proporciona una base sólida para el análisis estadístico.

Para el caso específico de esta investigación, la desviación estándar y el margen de error se calculan basándose en datos preliminares de estudios previos o pruebas piloto. Suponiendo una desviación estándar estimada y ajustando el tamaño de muestra a las necesidades prácticas del experimento, se establecen las siguientes réplicas:

- Número total de mezclas a preparar: 5 proporciones \times 2 réplicas = 10 mezclas.
- Número total de pruebas de resistencia: 10 mezclas \times 7 especímenes = 70 pruebas.

3.2.2.3 Criterios de inclusión y exclusión

a) Proporciones de mezcla: Las proporciones de cemento y cenizas volantes seleccionadas deben estar entre los niveles especificados (90/10, 85/15, 80/20, 75/25) y la mezcla testigo (100% cemento).

b) Tipo de agregados: Solo se usarán agregados aluviales del departamento del Atlántico, Colombia, para asegurar la relevancia regional de los resultados.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

c) Normas de ensayo: Las mezclas deben cumplir con los procedimientos de ensayo según NTC 396 y NTC 673 para asegurar la consistencia y validez de los resultados.

3.2.2.4 Criterios de exclusión

a) Proporciones no especificadas: Mezclas con proporciones fuera del rango definido o que no correspondan a las especificadas en el diseño experimental.

b) Agregados diferentes: Agregados aluviales que no provengan del departamento del Atlántico, Colombia.

c) Inconsistencias en la preparación: Mezclas que no cumplan con los estándares de preparación o ensayos definidos por las normas.

La implementación rigurosa de estos criterios asegura que los resultados del estudio sean confiables y representativos del impacto de las cenizas volantes en la resistencia del concreto.

3.3 Instrumentos

En el contexto de la investigación sobre el impacto ambiental y económico del uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de concreto, se utilizarán diversas herramientas de recolección de información para garantizar una recopilación precisa y completa de datos. A continuación, se describen cada una de estas herramientas, su objetivo, estructura, categorías, variables y formato.

3.3.1 Ensayos de resistencia a la compresión

Objetivo: Determinar la resistencia mecánica del concreto endurecido con diferentes proporciones de sustitución de cemento por cenizas volantes.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Estructura: Se prepararán 7 cilindros de concreto con las siguientes proporciones de cemento/cenizas volantes: 90/10, 85/15, 80/20, 75/25, y una mezcla testigo (100% cemento). Los cilindros se curarán y se someterán a pruebas de compresión a 3, 7 y 28 días.

Categorías: Proporción de mezcla, periodo de curado.

Variables:

- **Dependiente:** Resistencia mecánica del concreto (medida en MPa).
- **Independiente:** Proporción de cemento a cenizas volantes.

Formato: Físico, con ensayos realizados en una prensa hidráulica siguiendo las normas NTC 396 y NTC 673.

3.3.2 Diarios de campo

Objetivo: Documentar observaciones y reflexiones durante el proceso de preparación y ensayo de las mezclas de concreto.

Estructura: Registro diario de actividades, observaciones sobre el proceso de mezcla y curado, y notas sobre cualquier anomalía o problema.

Categorías: Procedimiento de mezcla, observaciones de curado, problemas y soluciones.

Variables:

- **Dependiente:** Observaciones prácticas durante el ensayo.
- **Independiente:** Proporción de cenizas volantes y condiciones de curado.

Formato: Físico, en formato de cuaderno, o digital, utilizando aplicaciones de notas en dispositivos móviles.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

3.3.3 Encuestas a profesionales del sector concretero

Objetivo: Obtener información detallada sobre la experiencia práctica y los desafíos asociados con la incorporación de cenizas volantes en la mezcla de concreto.

Estructura: Entrevistas semi-estructuradas con preguntas abiertas que permiten a los participantes discutir su experiencia, problemas encontrados y posibles soluciones.

Categorías: Experiencia práctica, desafíos técnicos, beneficios percibidos.

Variables:

- **Dependiente:** Opiniones y experiencias sobre la sustitución de cemento.
- **Independiente:** Experiencia en la industria y tipo de proyecto.

Formato: Físico o virtual, según disponibilidad y preferencia del entrevistado.

3.4 Descripción de procedimientos

3.4.1 Ensayos de resistencia a la compresión

Objetivo: Determinar la resistencia mecánica del concreto endurecido con diferentes proporciones de cenizas volantes.

Procedimiento:

Preparación de muestras: Se prepararán 7 cilindros de concreto con las siguientes proporciones de cemento a cenizas volantes: 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 y una mezcla testigo (100% cemento).

- **Materiales:** Cemento, cenizas volantes, agregados aluviales, agua, moldes cilíndricos.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- **Mezcla:** Las mezclas se prepararán siguiendo el diseño de mezcla estándar, sustituyendo las proporciones especificadas de cemento por cenizas volantes.

Curado: Los cilindros se curarán en condiciones controladas de humedad y temperatura durante 28 días, siguiendo la norma NTC 1377.

Ensayo de compresión:

- **Equipo:** Prensa hidráulica calibrada y certificada por la ONAC.
- **Tiempo:** Se realizarán ensayos a los 3, 7 y 28 días.
- **Lugar:** Laboratorio de concretos de la empresa Concremóvil, con capacidad para realizar ensayos de resistencia a compresión.
- **Autorizaciones:** Asegurar que el laboratorio esté capacitado para realizar ensayos conforme a las normas NTC 396 y NTC 673.

Capacitación: El personal encargado de la mezcla, curado y ensayos debe estar capacitado en las técnicas de preparación de muestras (NTC 550) y uso de la prensa hidráulica (NTC 673).

Tiempo estimado: La preparación y curado de muestras tomará aproximadamente 4 semanas, mientras que los ensayos de compresión se realizarán en los días especificados.

3.4.2 Diarios de campo

Objetivo: Documentar observaciones y reflexiones durante el proceso experimental.

Procedimiento:

- **Registro:**
 - **Formato:** físico (cuaderno de notas) o digital (aplicación de notas en dispositivos móviles).
 - **Contenido:** Observaciones sobre la mezcla, curado, problemas encontrados y ajustes realizados.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- **Frecuencia:** Registros diarios según las actividades realizadas.
- **Lugar:** En el laboratorio y durante las fases de preparación y ensayo del concreto.

Capacitación: El personal debe estar capacitado para documentar de manera precisa y detallada las observaciones y problemas durante el proceso.

Tiempo estimado: La documentación continua durante la preparación y curado de las mezclas tomará el tiempo del proceso experimental, es decir, aproximadamente 4 semanas.

3.4.3 Encuestas a profesionales del sector concretero

Objetivo: Recopilar experiencias prácticas y opiniones sobre la incorporación de cenizas volantes en concreto.

Procedimiento:

- **Preparación de la entrevista:**
 - **Formato:** Entrevista semi-estructurada con preguntas abiertas.
 - **Contenido:** Discusión sobre experiencias, desafíos y beneficios.
- **Realización:**
 - **Tiempo:** Cada entrevista durará aproximadamente 60-90 minutos.
 - **Lugar:** Puede ser realizada de manera presencial en las oficinas de los profesionales o de manera virtual mediante plataformas como Zoom o Microsoft Teams.
- **Autorizaciones:** Obtener consentimiento informado de los participantes.
- **Capacitación:** El entrevistador debe estar capacitado en técnicas de entrevista cualitativa para asegurar una correcta recopilación de información.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Tiempo Estimado: La programación y realización de entrevistas se completará en 4 semanas, incluyendo la transcripción y análisis de datos.

3.5 Análisis de información

El análisis de la información recolectada en esta investigación se llevará a cabo en varias etapas utilizando herramientas informáticas y software especializados. El objetivo es procesar los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión, encuestas, entrevistas y diarios de campo, para extraer conclusiones significativas sobre la eficacia de las cenizas volantes como material cementante en el concreto premezclado.

3.5.1 Procesamiento y análisis de datos de ensayos de resistencia a compresión.

- **Herramientas:**

- **Microsoft Excel:** Para la organización, cálculo y visualización de datos.

- **Procedimiento:**

- **a) Ingreso de datos:**

- ✓ **Recopilación:** Los resultados de los ensayos de compresión a 3, 7 y 28 días se ingresarán en una hoja de cálculo de Excel.
 - ✓ **Estructura:** Se crearán columnas para las proporciones de cemento a cenizas volantes, fechas de ensayo, y resultados de resistencia a compresión.

- **b) Cálculo Estadístico:**

- ✓ **Medidas de tendencia central:** Cálculo de medias, medianas y modas de las resistencias obtenidas.
 - ✓ **Medidas de dispersión:** Cálculo de desviación estándar y varianza para evaluar la variabilidad de los datos.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- ✓ **Análisis de tendencias:** Utilización de gráficos de dispersión para observar tendencias en la resistencia a compresión según las proporciones de cenizas volantes.

c) Comparaciones:

Análisis de varianza (ANOVA): Para comparar las medias de resistencia entre diferentes proporciones de cenizas volantes y el testigo.

d) Visualización de Datos:

Gráficos y tablas: Creación de gráficos de barras y líneas para representar visualmente los resultados y facilitar la interpretación.

3.6 Consideraciones éticas

3.6.1 Análisis de consideraciones éticas

En la realización de la investigación, es fundamental garantizar que todas las actividades se realicen en cumplimiento con las consideraciones éticas establecidas por UNIMINUTO y la comunidad científica en general. Estas consideraciones aseguran la integridad del estudio, la protección de los participantes y el respeto por las normas éticas de investigación

3.6.2 Acuerdo de confidencialidad y privacidad

La confidencialidad de los datos personales y la privacidad de los participantes, así como los datos recolectados, serán estrictamente protegidas a lo largo del proyecto.

3.6.2.1 Procedimiento

- **Información anónima:** Los datos recolectados serán anonimizados, eliminando cualquier información que pueda identificar a los participantes.

- **Seguridad de datos:** La información se almacenará en servidores seguros y accesibles solo a los investigadores autorizados. Los datos físicos se guardarán en un lugar seguro con acceso restringido.
- **Protección legal:** Se seguirán las normativas legales y las directrices de protección de datos vigentes para asegurar que la información personal no se divulgue sin el consentimiento adecuado.

4 HIPÓTESIS

Dado que una parte significativa de la investigación se centra en la experimentación cuantitativa para determinar los efectos de la sustitución de cemento por cenizas volantes, se formularán hipótesis específicas que se puedan probar mediante experimentación y análisis estadístico. En esta sección se presentan las hipótesis correspondientes.

4.1 Hipótesis Principal:

- **Hipótesis Nula (H0):** La sustitución de cemento por cenizas volantes en las proporciones evaluadas (90/10, 85/15, 80/20, 75/25) no tiene un efecto significativo sobre la resistencia mecánica del concreto premezclado comparado con una mezcla sin sustitución (100% cemento).
 - **Justificación:** La hipótesis nula (H0) se basa en la premisa de que las cenizas volantes, a pesar de su potencial puzolánico, no cambiarán significativamente las propiedades mecánicas del concreto. Esta hipótesis sirve como base para contrastar cualquier mejora o deterioro en la resistencia mecánica.
- **Hipótesis Alternativa (H1):** La sustitución de cemento por cenizas volantes en las proporciones evaluadas (90/10, 85/15, 80/20, 75/25) tiene un efecto significativo sobre la resistencia mecánica del concreto premezclado comparado con una mezcla sin sustitución (100% cemento).

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- **Justificación:** La hipótesis alternativa (H1) sugiere que el uso de cenizas volantes puede influir positivamente o negativamente en la resistencia del concreto. Esta hipótesis se fundamenta en estudios previos que han mostrado efectos variados de las cenizas volantes en la resistencia del concreto, dependiendo de su proporción y características.

4.2 Variables

4.2.1 Variable(s) independiente(s)

La proporción cemento/ceniza es la relación en la mezcla de concreto entre el cemento y las cenizas volantes utilizadas como material cementante suplementario. Esta variable es controlada y manipulada en el experimento para evaluar su efecto sobre la resistencia mecánica del concreto.

Se establece como el porcentaje de sustitución de cemento por cenizas volantes en la mezcla de concreto. Se mide en porcentajes (%), indicando la fracción de cemento sustituido por cenizas volantes en la mezcla. Las proporciones a evaluar son:

- 90% cemento / 10% cenizas volantes
- 85% cemento / 15% cenizas volantes
- 80% cemento / 20% cenizas volantes
- 75% cemento / 25% cenizas volantes
- 100% cemento (mezcla testigo o patrón sin sustitución)

4.2.2 Variable(s) dependiente(s)

La **resistencia mecánica del concreto endurecido** es la capacidad del concreto para soportar cargas y resistir fuerzas aplicadas sin fallar. Es una medida crucial de la calidad del concreto, ya que determina su desempeño estructural en aplicaciones prácticas. Esta variable se mide a través de ensayos de compresión en el concreto curado, utilizando una prensa hidráulica para aplicar carga y registrar la resistencia máxima antes de la falla. La resistencia se evalúa a diferentes intervalos de tiempo (3, 7 y 28 días) para obtener una visión completa de la evolución de las propiedades del concreto con el tiempo. La resistencia mecánica se expresa en megapascales (MPa) o en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²), dependiendo del estándar de medición utilizado en el ensayo.

4.2.3 Relación entre variables

La **variable independiente** (proporción cemento/ceniza) se manipula en el diseño experimental para observar su impacto en la **variable dependiente** (resistencia mecánica del concreto endurecido). La investigación busca determinar si las diferentes proporciones de cenizas volantes afectan positivamente o negativamente la resistencia del concreto en comparación con el uso exclusivo de cemento.

4.3 Planteamiento de hipótesis

Planteamiento del problema: La investigación se centra en la posibilidad de reducir el consumo de cemento y, al mismo tiempo, mitigar el impacto ambiental al utilizar cenizas volantes como material cementante suplementario. Esto se debe a que el cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono en la industria de la construcción. La hipótesis explora si esta sustitución tiene un efecto positivo o negativo en la resistencia mecánica del concreto, lo cual es crucial para validar su viabilidad técnica y económica.

Revisión literaria: La literatura existente sugiere que las cenizas volantes pueden mejorar las propiedades del concreto, incluyendo su resistencia y durabilidad, al reaccionar con los

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

componentes de la mezcla de concreto. Sin embargo, también hay estudios que indican que el exceso de sustitución podría afectar negativamente la resistencia del concreto. Por lo tanto, se plantea la hipótesis para investigar empíricamente el efecto real de la sustitución en diferentes proporciones.

Experiencia del investigador: Basado en experiencias anteriores y trabajos previos en la industria del concreto, se anticipa que ciertas proporciones de cenizas volantes podrían ofrecer un equilibrio entre reducción de costos y mantenimiento de la resistencia mecánica adecuada. La hipótesis es una proposición tentativa que busca confirmar si las cenizas volantes, dentro de las proporciones especificadas, pueden ser una alternativa efectiva al cemento sin comprometer la calidad del concreto.

5 RESULTADOS

5.1.1 Características de los materiales

Para la elaboración de las mezclas se utilizaron los siguientes materiales:

- Agua: potable
- Cemento: Argos tipo ART (estructural)
- Ceniza: Termoguajira (Mingueo)
- Arena: Aluvial
- Grava: Aluvial TMN ¾"
- Aditivo 1: Superplastificante
- Aditivo 1: Superplastificante retardante

5.1.2 Diseño de mezcla

Para la realización de los ensayos se utilizó un diseño de mezcla de concreto de resistencia 3000 PSI (21 MPa) asentamiento 6" +/- 1", validado a nivel industrial con 100% cemento como material cementante.

Tabla 2. *Dosificación por metro cúbico para diseño de mezcla de concreto 21 MPa*

Dosificación por m³ (SSS) (kg)	Resistencia 21 MPa Slump 6" +/-1"
AGUA	175
CEMENTO	315
ARENA	1000
GRAVA	915
ADITIVO 1	1.58
ADITIVO 2	2.21

Se realiza el muestreo a los agregados previamente caracterizados y separados mediante el método de cuarteo de la NTC 3674. Se utilizan las absorciones de la caracterización para realizar las correcciones de humedad.

Tabla 3. *Humedad y absorción de los agregados*

AGREGADO	HUMEDAD	ABSORCIÓN
ARENA GRUESA	5	1,1
GRAVA	2	1,5

5.1.3 Escalamiento del diseño

Se procede a realizar la corrección por humedades y el escalamiento a 28 litros de mezcla, de acuerdo a la NTC 454: Toma de muestra de concreto en estado fresco.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Tabla 4. Escalamiento del diseño de mezcla a 28 litros (mezcla testigo)

Materiales (28L)	Dosificación (kg) Testigo (100%)
AGUA	3.94
CEMENTO	9.45
ARENA	31.17
GRAVA	27.59
ADITIVO 1	0,0536
ADITIVO 2	0,0696

A partir del diseño testigo (28 litros; 100% cemento), se sustituyen los porcentajes de cenizas volantes propuestas en el diseño experimental, para evaluar su efecto en la resistencia mecánica del concreto.

Tabla 5. Dosificación para 28 L de la mezcla 90/10

Materiales (28L)	Dosificación (kg) 90/10
AGUA	3.94
CEMENTO	8.51
CENIZA	0.95
ARENA	31.17
GRAVA	27.59
ADITIVO 1	53.6

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Tabla 6. *Dosificación para 28 L de la mezcla 85/15*

Materiales (28L)	Dosificación (kg) 85/15
AGUA	3.94
CEMENTO	8.03
CENIZA	1.42
ARENA	31.17
GRAVA	27.59
ADITIVO 1	53.6
ADITIVO 2	69.6

Tabla 7. *Dosificación para 28 L de la mezcla 80/20*

Materiales (28L)	Dosificación (kg) 80/20
AGUA	3.94
CEMENTO	7.56
CENIZA	1.89
ARENA	31.17
GRAVA	27.59
ADITIVO 1	53.6
ADITIVO 2	69.6

Tabla 8. *Dosificación para 28 L de la mezcla 75/25*

Materiales (28L)	Dosificación (kg) 75/25
AGUA	3.94
CEMENTO	7.09
CENIZA	2.36
ARENA	31.17
GRAVA	27.59
ADITIVO 1	53.6
ADITIVO 2	69.6

5.2 Codificación de datos

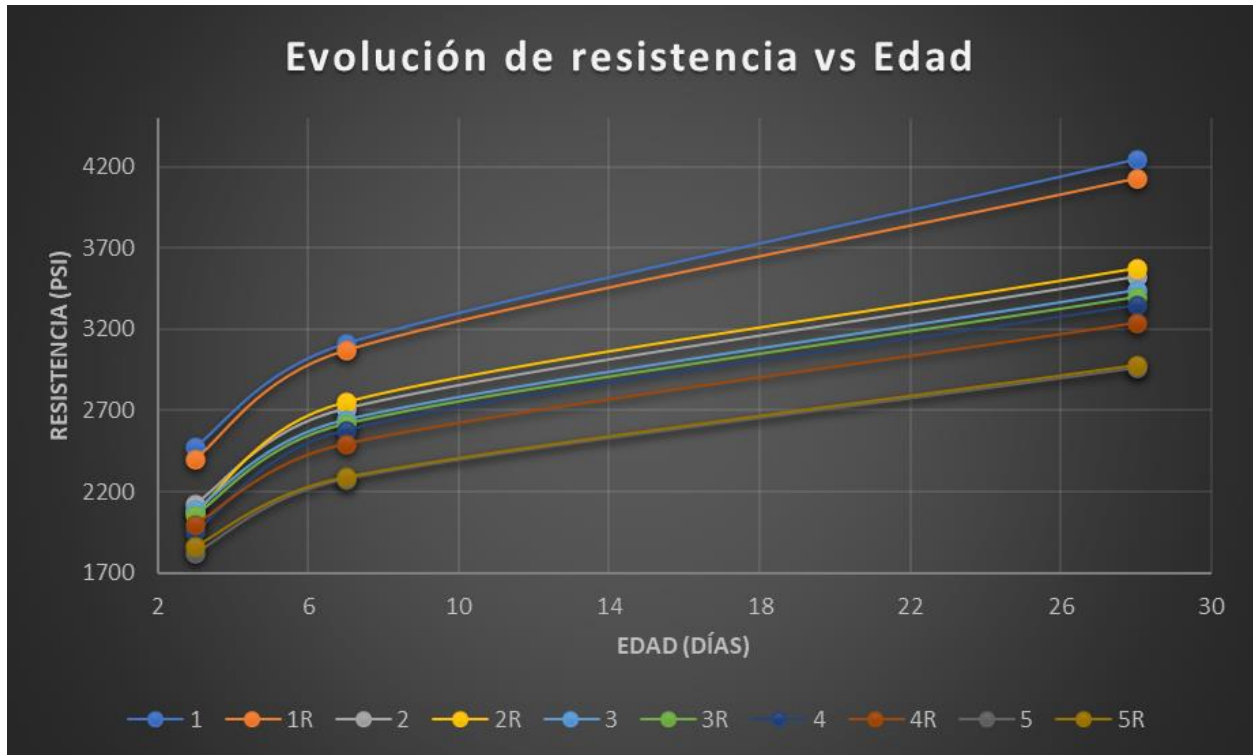
En la siguiente tabla se presentan los resultados de ensayos de resistencia a la compresión de las muestras obtenidas en los experimentos y sus respectivas réplicas, a las edades especificadas:

Tabla 9. *Resultados de ensayos de resistencia a la compresión*

RESISTENCIA (PSI)	3000		EDAD DE ENSAYO								
			N° ensayo	descripción	Slump (in)	3D (PSI)	3D (%)	7D (PSI)	7D (%)	28D (PSI)	28D (%)
			1	100% cemento	7 1/2	2478	83%	3111	104%	4244	141%
			1R	100% cemento	7	2404	80%	3071	102%	4127	138%
			2	90/10	7 1/4	2123	71%	2711	90%	3524	117%
			2R	90/10	7 1/2	2072	69%	2751	92%	3576	119%
			3	85/15	7 1/2	2095	70%	2644	88%	3437	115%
			3R	85/15	7	2054	68%	2618	87%	3403	113%
			4	80/20	7	1954	65%	2579	86%	3353	112%
			4R	80/20	7 1/4	1996	67%	2495	83%	3244	108%
			5	75/25	7 1/2	1822	61%	2278	76%	2961	99%
			5R	75/25	7	1868	62%	2292	76%	2980	99%

5.2.1 Análisis de datos

Figura 3. *Curvas de evolución de resistencia a la compresión*



La gráfica incluye cinco conjuntos de datos correspondientes a mezclas de concreto con diferentes proporciones de cemento y ceniza, y sus réplicas. Cada conjunto de datos se representa en la gráfica con puntos que indican la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades de ensayo (3, 7 y 28 días).

5.2.1.1 Análisis de varianza

El análisis de la varianza (ANOVA) es una herramienta que se usa para dividir la varianza observada en una variable concreta en componentes atribuibles a diferentes fuentes de variación. Se procede a realizar el ANOVA con los datos obtenidos, mediante la herramienta Excel:

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Tabla 10. *Resumen análisis de varianza de un factor*

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
3D	10	20866	2086,6	44466,4889
7D	10	26549,5	2654,95	77831,6917
28D	10	34848,75	3484,875	179240,132

Tabla 11. *Análisis de varianza*

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9889900,68	2	4944950,34	49,1972344	9,9232E-10	3,35413083
Dentro de los grupos	2713844,81	27	100512,771			
Total	12603745,5	29				

5.2.2 Observaciones por conjunto de datos

En general, a medida que aumenta la edad del concreto, la resistencia a la compresión también aumenta para todas las mezclas, lo que es consistente con el comportamiento esperado del concreto que endurece con el tiempo.

- **100% Cemento (Serie 1 y 1R):**
 - **Tendencia:** La resistencia a la compresión aumenta con la edad del concreto.
 - **3 días:** Alrededor de 2478 PSI (2478 para la primera muestra y 2404 para la réplica).
 - **7 días:** Alrededor de 3111 PSI (3071 para la réplica).
 - **28 días:** Alrededor de 4244 PSI (4127 para la réplica).
- **90/10 (Serie 2 y 2R):**
 - **Tendencia:** La resistencia también aumenta con la edad, pero es menor en comparación con el 100% cemento.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- **3 días:** Alrededor de 2123 PSI (2072 para la réplica).
- **7 días:** Alrededor de 2711 PSI (2751 para la réplica).
- **28 días:** Alrededor de 3524 PSI (3576 para la réplica).
- **85/15 (Serie 3 y 3R):**
 - **Tendencia:** La resistencia a la compresión sigue una tendencia creciente, pero es menor en comparación con las mezclas con mayor proporción de cemento.
 - **3 días:** Alrededor de 2095 PSI (2054 para la réplica).
 - **7 días:** Alrededor de 2644 PSI (2618 para la réplica).
 - **28 días:** Alrededor de 3437 PSI (3403 para la réplica).
- **80/20 (Serie 4 y 4R):**
 - **Tendencia:** La resistencia es aún menor, pero sigue una tendencia creciente con el tiempo.
 - **3 días:** Alrededor de 1954 PSI (1996 para la réplica).
 - **7 días:** Alrededor de 2579 PSI (2495 para la réplica).
 - **28 días:** Alrededor de 3353 PSI (3244 para la réplica).
- **75/25 (Serie 5 y 5R):**
 - **Tendencia:** La resistencia es la más baja entre los diferentes tipos de mezcla, pero también aumenta con la edad.
 - **3 días:** Alrededor de 1822 PSI (1868 para la réplica).
 - **7 días:** Alrededor de 2278 PSI (2292 para la réplica).
 - **28 días:** Alrededor de 2961 PSI (2980 para la réplica).

5.2.3 Análisis de tendencia

5.2.3.1 Efecto del cambio en la proporción de cemento/ceniza

El cambio en la proporción de cemento a ceniza en la mezcla tiene un impacto significativo en la resistencia a la compresión. A medida que aumenta la cantidad de ceniza en lugar de cemento, la resistencia a la compresión tiende a disminuir, aunque sigue aumentando con la edad del concreto. A continuación, se detallan los efectos observados:

1. 100% Cemento:

- **Resistencia alta:** Las mezclas con 100% de cemento tienen la mayor resistencia a la compresión en comparación con las mezclas con ceniza. Esto es esperado, ya que el cemento proporciona la matriz de hidratación y la formación de geles de cemento, que contribuyen a una alta resistencia.

2. 90/10 (Cemento/Ceniza):

- **Reducción moderada:** La resistencia a la compresión es menor que la de 100% cemento, pero aun significativamente alta. La reducción en la resistencia puede deberse a que la ceniza volante reemplaza una parte del cemento, reduciendo la cantidad de cemento disponible para formar los geles de hidratación.

3. 85/15 (Cemento/Ceniza):

- **Disminución continuada:** La resistencia a la compresión disminuye más con una mayor proporción de ceniza. La ceniza, aunque actúa como un material puzolánico que puede reaccionar con los productos de hidratación del cemento, no tiene la misma capacidad que el cemento para formar una estructura de resistencia.

4. 80/20 (Cemento/Ceniza):

- **Reducción significativa:** La disminución en la resistencia es más pronunciada a medida que la proporción de ceniza aumenta. Esto sugiere que la capacidad de la

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

ceniza para reemplazar el cemento en la mezcla disminuye, afectando la estructura y la resistencia del concreto.

5. 75/25 (Cemento/Ceniza):

- **Resistencia más baja:** Las mezclas con la mayor proporción de ceniza muestran la menor resistencia a la compresión. A pesar de que las cenizas tienen propiedades puzolánicas, su eficacia en la formación de una estructura resistente es menor en comparación con el cemento.

5.2.3.2 *Resistencia a la compresión con la edad*

La gráfica de dispersión muestra claramente que la resistencia a la compresión del concreto aumenta con la edad de ensayo para todas las mezclas probadas, lo cual es una característica esperada del comportamiento del concreto. Esto es consistente con el proceso de hidratación del cemento, que continúa desarrollándose con el tiempo, aumentando la resistencia del concreto:

- **3 días:** Las resistencias son significativamente más bajas. Esto se debe a que la hidratación del cemento es aún parcial y el concreto no ha alcanzado su capacidad máxima de resistencia.
- **7 días:** La resistencia aumenta considerablemente, reflejando el progreso en el proceso de hidratación.
- **28 días:** Las resistencias alcanzan un nivel más alto y más estable, mostrando el desarrollo casi completo de la resistencia del concreto.

5.2.3.3 *Consideraciones adicionales*

- **Variabilidad de resultados:** Se observa cierta variabilidad en los resultados entre las réplicas (ej., 1 vs. 1R, 2 vs. 2R). Esto puede deberse a variaciones en la preparación de las muestras o en las condiciones de ensayo. Es importante tener en cuenta esta

variabilidad al interpretar los resultados y considerar ajustes en los procedimientos experimentales para mejorar la consistencia.

- **Efecto a largo plazo:** Aunque la resistencia a 28 días es un buen indicador del rendimiento a largo plazo del concreto, se recomienda evaluar el comportamiento a edades mayores para obtener una comprensión más completa de las propiedades del concreto con cenizas volantes.

6 CONCLUSIONES

6.1 Cumplimiento de objetivos y pregunta de investigación

El objetivo general de la investigación fue evaluar el impacto ambiental y económico del uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de concreto premezclado en la industria de la construcción en Colombia. La investigación ha logrado abordar este objetivo de manera efectiva, proporcionando un análisis detallado sobre cómo la sustitución de cemento por cenizas volantes afecta tanto la resistencia mecánica del concreto como las implicaciones económicas y ambientales.

6.2 Pregunta de investigación

La pregunta central de esta investigación era: ¿Qué impacto ambiental y económico generaría el uso de cenizas volantes como material cementante suplementario en la producción de hormigón premezclado de la industria concretera en Colombia? La investigación ha respondido a esta pregunta al demostrar que la sustitución de cemento por cenizas volantes proporciona beneficios ambientales y económicos significativos en la producción de concreto: se pueden conseguir resultados satisfactorios con reemplazos de hasta el 15% de material cementante por cenizas volantes, atacando el problema ambiental que causa la generación en gran volumen de este residuo industrial.

6.3 Evaluación de la hipótesis

La hipótesis planteada fue que la sustitución de cemento por cenizas volantes en la mezcla de concreto premezclado afectaría negativamente la resistencia a la compresión del concreto, pero ofrecería beneficios económicos y ambientales. Los resultados obtenidos confirman esta hipótesis en gran medida:

- **Resistencia mecánica:** La investigación ha demostrado que el aumento en la proporción de cenizas volantes en la mezcla de concreto reduce la resistencia a la compresión, corroborando la hipótesis. Las mezclas con mayores porcentajes de ceniza mostraron una resistencia menor en comparación con las mezclas que contenían solo cemento. Esta reducción es consistente con los hallazgos de la revisión literaria, que indican que aunque las cenizas volantes tienen propiedades puzolánicas, no igualan la capacidad del cemento para formar una matriz resistente.
- **Beneficios ambientales y económicos:** A pesar de la reducción en la resistencia, la sustitución de cemento por cenizas volantes tiene implicaciones positivas en términos de sostenibilidad. La investigación confirma que el uso de cenizas volantes reduce la necesidad de cemento, lo que a su vez disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento. Además, el uso de cenizas volantes, que son un subproducto de las plantas termoeléctricas, ayuda a gestionar residuos industriales, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

6.4 Impacto en el campo de estudio

La investigación proporciona una contribución significativa al campo de la construcción y a la sostenibilidad ambiental:

- **Impacto Ambiental:** La investigación destaca que la utilización de cenizas volantes como sustituto del cemento puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta contribución es crucial en un contexto global donde la reducción de la huella de carbono es una prioridad. La investigación respalda la adopción de

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

prácticas más sostenibles en la industria de la construcción, ofreciendo una solución viable para reducir el impacto ambiental de la producción de concreto.

- **Impacto económico:** Los resultados muestran que la sustitución de cemento por cenizas volantes puede reducir los costos de producción del concreto debido al menor costo de las cenizas en comparación con el cemento. Esto proporciona una ventaja económica a las empresas productoras de concreto, que pueden beneficiarse de una reducción en los costos de materiales mientras contribuyen a la sostenibilidad.
- **Impacto técnico:** La investigación también aporta conocimientos técnicos sobre cómo diferentes proporciones de cenizas volantes afectan la resistencia del concreto. Esto puede guiar a los ingenieros y diseñadores de mezclas en la optimización de las fórmulas de concreto para aplicaciones específicas, equilibrando las necesidades de resistencia con los beneficios ambientales.

6.5 Nuevos temas de investigación

A partir de los hallazgos de esta investigación, surgen varias áreas potenciales para futuras investigaciones:

- **Optimización de proporciones:** Investigar las proporciones óptimas de cenizas volantes en mezclas de concreto para aplicaciones específicas, como estructuras de alto rendimiento o pavimentos, para encontrar un equilibrio adecuado entre resistencia, durabilidad y sostenibilidad.
- **Evaluación a largo plazo:** Realizar estudios adicionales sobre el comportamiento a largo plazo del concreto con cenizas volantes, incluyendo la durabilidad y la resistencia a condiciones ambientales adversas, para comprender mejor el impacto de estas mezclas en la vida útil de las estructuras.
- **Alternativas a las cenizas volantes:** Explorar otras alternativas a las cenizas volantes, como la incorporación de residuos industriales adicionales o materiales reciclados, para determinar su impacto en la resistencia del concreto y sus beneficios ambientales y económicos.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

- **Impacto social y económico:** Realizar estudios que evalúen el impacto social y económico de la implementación a gran escala de cenizas volantes en la industria de la construcción, incluyendo la aceptación del mercado y los efectos en el empleo y la economía local.

6.6 Conclusiones finales

En resumen, la investigación ha demostrado que la sustitución de cemento por cenizas volantes en mezclas de concreto premezclado tiene un impacto significativo en la resistencia a la compresión del concreto, con una disminución notable a medida que aumenta la proporción de ceniza. Sin embargo, también proporciona importantes beneficios ambientales y económicos, apoyando la sostenibilidad en la industria de la construcción. Los hallazgos de esta investigación no solo ofrecen una base sólida para futuras investigaciones en la optimización de mezclas de concreto, sino que también destacan la importancia de integrar prácticas más sostenibles en la construcción. Las recomendaciones derivadas de este estudio pueden guiar a los profesionales de la construcción y a los responsables de políticas en la adopción de estrategias que equilibren la resistencia del concreto con la sostenibilidad ambiental y los beneficios económicos.

Referencias

- A. Escobar (2012). Efecto del uso de ceniza volante en el proceso de agrietamiento del concreto por corrosión del acero de refuerzo.
- A. Latorre (2008). La industria del cemento en Colombia: determinantes y comportamiento de la demanda.
- B. Hudson (1998). Aggregate Shape Affects Concrete Cost.
- C. Anish, R. Venkata Krishnaiah, K. Vijaya Bhaskar Raju (2023). Strength behavior of green concrete by using fly ash and silica fume.
- C. Argiz, E. Menéndez, M, Sanjuán (2012). Efecto de la adición de mezclas de ceniza volante y ceniza de fondo procedentes del carbón en la resistencia mecánica y porosidad de cementos Portland.
- C. Olague, G. Wenglas, F. Astorgas (2011). Adiciones minerales como atenuantes de la reacción álcali sílice en estructuras de concreto hidráulico.
- C. Orozco, S.Babel, S.Tangtermsirikul, T. Sugiyama (2023). Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation.
- Corfi colombiana (2023). Actualidad del sector energético colombiano.
- Departamento administrativo nacional de estadísticas DANE (2023). Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC): Boletín técnico.
- Departamento administrativo nacional de estadísticas DANE (2023). Estadísticas de concreto premezclado.
- D.G. Montgomery, D.C. Hughes, R.I.T. Williams (1981). Fly ash in concrete: a microstructure study.
- D. Ravina, P. K. Mehta (1986). Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

D.W.S. Ho, R.K. Lewis (1985). Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete.

Dzigita Nagrockiene, Aurimas Rutkauskas (2018). The effect of fly ash additive on the resistance of concrete to alkali silica reaction.

E. Khankhaje, T. Kim, H. Jang, K. Chang-Soo, J. Kim (2023). Properties of pervious concrete incorporating fly ash as partial replacement of cement: *A review*.

E. Vásquez (2007). Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante.

F. Rolong (2012). El auge de la construcción en Colombia: un crecimiento real del sector o una burbuja que puede estallar.

Global Cement and Concrete Association GCCA (2021). Futuro del hormigón.

Global Cement and Concrete Association GCCA (2023). Declaración de aspiración climática de GCCA: *Hacia un hormigón neutro en carbono*.

G. Idorn, N. Thaulow (1985). Effectiveness of research on fly ash in concrete.

J.R. Santiago (1988). El empleo de las cenizas volantes en la fabricación de los hormigones.

L. Lam, Y.L. Wong, C.S. Poon (2000). Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems.

M. Montemor, A. Simoes, M. Salta (2000). Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS.

M. Sahmaran, I. Ozgur (2005). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash.

M. Uysal, V. Akyuncu (2012). Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes.

Nagrockiene, D., et al. (2018). *Alkali-Silica Reaction in Concrete: Control and Management*. Journal of Construction and Building Materials.

O. Molina (2008). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón.

Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

P. K. Mehta (1985). Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures.

P. Quiroga (2003).the effect of the aggregates characteristics on the performance of portland cement.

P. Valdéz, A. Durán, J. Rivera, C. Juárez (2007.) Concretos fluidos con altos volúmenes de cenizas volantes.

P.R. Wankhede, V.A. Fulari (2014). Effect of fly ash on properties of concrete.

R. Siddique (2002). Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete.

S. Hernández (2008). Diseño sustentable de materiales de construcción: caso del concreto de matriz de cemento Portland.

S.S. Ansari, M. Shariq, Z. Mohammad, S. Akhtar, A. Masood (2023). Effect of elevated temperature on the structural performance of reinforced high volume fly ash concrete.

V.M. Malhotra (1990). Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (astm class f) fly ash.

V. Johansen, P. Andersen (1991). Particle packing and concrete properties. materials science of concrete.

W. Fajun, M. Grutzeck, D. Roy (1985). The retarding effects of fly ash upon the hydration of cement pastes: *the first 24 hours*.

Y.S. Wudil, Amin Al-Fakih, Mohammed A. Al-Osta, M.A. Gondal (2023). Intelligent optimization for modeling carbon dioxide footprint in fly ash geopolymer concrete: *A novel approach for minimizing CO₂ emissions*.

Anexos

Figura 4. Ensayo de asentamiento (NTC 396)



Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Figura 5. *Ensayo de masa unitaria (NTC 1926)*



Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Figura 6. *Ensayo de contenido de aire (NTC 1032)*



Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Figura 7. *Elaboración de especímenes de concreto (NTC 550)*



Figura 8. *Certificado de calibración prensa hidráulica*



Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Figura 9. Ensayos de resistencia a la compresión (NTC 673)



Producción de concreto con cenizas volantes: impacto ambiental y beneficios económicos

Figura 10. *Cilindro ensayado*

