


**APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS DE CARBÓN GENERADAS EN LA
CENTRAL TERMOTASAJERO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES
ECOLÓGICOS**

AUTORAS:

ALEXANDRA AMAYA ARDILA

MAVIS MARCELA HERNANDEZ CASTRO



**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR
2021**

**APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS DE CARBÓN GENERADAS EN LA
CENTRAL TERMOTASAJERO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES
ECOLOGICOS**

AUTORAS:

ALEXANDRA AMAYA ARDILA
MAVIS MARCELA HERNANDEZ CASTRO

DIRECTOR:

EBERTO RAFAEL ORTEGA SINNING

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR**

2021

I. DEDICATORIA

Dedicado principalmente a Dios quien nos bendice y nos ha dado la fuerza y sabiduría para obtener este logro, a nuestros padres por su apoyo incondicional y a todas las personas que nos brindaron su acompañamiento en este proceso, aportando tanto a nuestro desarrollo personal como profesional.



II. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres por los valores y principios que nos han inculcado y a toda nuestra familia por sus palabras de aliento y que de una u otra forma nos apoyaron de manera desinteresada a lo largo de este proceso.

De igual manera nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Popular del Cesar, a la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas y a todo el cuerpo de docentes quienes con sus conocimientos nos formaron día a día como profesionales, gracias por su paciencia y apoyo incondicional.

A la termoeléctrica Termotasajero por brindarnos los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto y así alcanzar nuestras metas.



III. RESUMEN

El proyecto de investigación presenta una metodología para establecer el porcentaje de remplazo de cenizas que puede realizarse en una mezcla de concreto destinada a la fabricación de adoquines, determinando así la proporción óptima a implementar para mejorar las propiedades en cuanto a resistencia a la flexión y absorción de agua de los adoquines.

Posterior a ello, se realizan las respectivas pruebas a los adoquines provenientes de los distintos diseños de mezcla que contienen cierto porcentaje de cemento, reemplazado por ceniza (5%, 10%, 15% y 20%) y a nuestra mezcla patrón, la cual no contiene ceniza. La dosificación que presentó mejores resultados en cuanto a resistencia y superó el valor de resistencia al cual se había diseñado la mezcla, fue la mezcla 2 (10%), obteniéndose una resistencia a los 28 días de 6,1Mpa y una absorción de agua de 3,03%.

La confección de adoquines ecológicos realizados con cenizas volantes, en el aspecto de costo-beneficio, resulta factible económica y ambientalmente. Considerándose que se presenta una reducción notable de cemento, con lo cual se logra una menor inversión en cuanto a materia prima requerida; se produce un beneficio al medio ambiente ya que se está reutilizando un residuo peligroso para el mismo. Por último, se obtiene un adoquín con resistencias mayores a las estipuladas en la norma y de buena apariencia.

Palabras Clave: Cenizas volantes, adoquines ecológicos, concreto, mezcla y modulo rotura.

ABSTRACT

The research project presents a methodology to establish the percentage of ash replacement that can be carried out in a concrete mix intended for the manufacture of pavers, thus determining the optimum proportion to be implemented to improve the properties in terms of flexural strength and water absorption of the pavers.

After that, the respective tests were carried out on the pavers from the different mix designs that had a certain percentage of cement replaced by ash (5%, 10%, 15% and 20%) and on our standard mix, which did not contain ash. The dosage that presented the best results in terms of resistance and exceeded the resistance value for which the mix had been designed was mix 2 (10%), obtaining a resistance at 28 days of 6.1 MPa and a water absorption of 3.03%.

The production of ecological paving stones made with fly ash, from a cost-benefit point of view, is economically and environmentally feasible. Considering that there is a notable reduction of cement, which results in a lower investment in terms of raw material required; there is a benefit to the environment since a waste that is hazardous to the environment is being reused. Finally, we obtain a paving stone with a resistance higher than those stipulated in the standard and with a good appearance.

Keywords: Fly ash, ecological pavers, concrete, mix and modulus of rupture.

IV. Contenido

V.	LISTA DE TABLAS.....	1
VI.	LISTA DE FIGURA	4
VII.	LISTA DE GRÁFICOS.....	8
	INTRODUCCIÓN	9
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
4.2.	OBJETIVO GENERAL.....	16
4.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
5.2.	MARCO TEÓRICO.....	23
5.2.1.	Mineral.....	23
5.2.2.	Rocas sedimentarias	24
5.2.3.	Recurso Carbón	24
5.2.4.	El periodo Carbonífero	26
5.2.5.	Carbón	27
5.2.6.	Centrales térmicas de generación de energía eléctrica	29
5.2.7.	Cenizas volantes	32
5.2.8.	Cemento.....	36
5.2.9.	Adoquín	37
5.3.	MARCO CONCEPTUAL	39
5.4.	MARCO CONTEXTUAL.....	42

5.5.	MARCO LEGAL.....	45
5.6.	MARCO INSTITUCIONAL	48
	TERMOTASAJERO HOY	48
6.1.	LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN	50
6.2.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	50
6.3.	POBLACIÓN.....	51
6.4.	MUESTRA	51
6.5.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	52
6.6.	METODOLOGÍA DE DISEÑO	54
6.6.1.	Dimensiones estándar del adoquín a utilizar	55
6.7.	DESARROLLO METODOLÓGICO	56
6.8.	PROCEDIMIENTO DE LA ELABORACIÓN DE MEZCLA PARA LOS ADOQUINES	58
7.2.	Caracterización de los materiales.....	60
7.2.1.	Granulometría del agregado fino.....	60
7.2.2.	Granulometría del agregado grueso.....	61
7.2.3.	Proporción de los agregados para el diseño de mezcla (Método de Fuller)..	63
7.2.4.	Cenizas volantes	67
7.3.	Diseño de mezcla de concreto.....	68
7.3.1.	Corrección del diseño de mezcla por el cambio de la relación Agua/Cemento 78	
7.3.2.	Realización de la mezcla con el ajuste por adición de agua.....	81
7.4.	Recolección de resultados de adoquines sometidos a flexión y absorción de agua 83	
7.4.1.	Resultados de adoquines sometidos a la prueba de Modulo Rotura.....	83

7.4.2.	Resultados globales de adoquines sometidos a prueba de Modulo Rotura ...	86
7.4.3.	Resultados de adoquines sometidos a prueba de Absorción de agua	88
7.5.	Análisis entre la diferencia de los costos y beneficios que se obtienen al optar por la utilización de un adoquín ecológico o uno convencional	90
7.5.1.	Costos Indirectos	91
7.5.2.	Costo de 1m ³ de mezcla para la elaboración de adoquines convencionales.	92
7.5.3.	Costo de 1m ³ de mezcla para la elaboración de adoquines ecológicos	93
8.	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES	101
	REFERENCIAS	102
	ANEXOS.....	110
	ANEXOS FOTOGRÁFICOS	117



V. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. NORMATIVIDAD LEGAL	45
Tabla 2. DISEÑO EXPERIMENTAL	54
Tabla 3. Etapa 1 - Desarrollo Metodológico	56
Tabla 4. Etapa 2 - Desarrollo Metodológico	56
Tabla 5. Etapa 3 - Desarrollo Metodológico	57
Tabla 6. Etapa 4 - Desarrollo Metodológico	57
Tabla 7. Pasos para diseño de mezcla	58
Tabla 8. Granulometría de agregado fino	60
Tabla 9. Granulometría de agregado grueso	62
Tabla 10. %pasa de agregados y %pasa Fuller	63
Tabla 11. Módulos Granulométricos	64
Tabla 12. %pasa de agregados, Fuller y Mezcla	66
Tabla 13. Características físicas de las cenizas volantes de Termotasajero	68
Tabla 14. Datos del Agregado Grueso	68
Tabla 15. Datos del Agregado Fino	69
Tabla 16. Datos del Cemento	69
Tabla 17. Selección de asentamiento	70

Tabla 18. Asentamiento para concretos sin aire incluido	71
Tabla 19. Resistencia promedio requerida a la compresión cuando no hay datos que permiten determinar la desviación estándar	72
Tabla 20. Proporciones de materiales	76
↱ Tabla 21. Aporte de agua por los materiales	77
Tabla 22. Cálculo de cantidad de cemento	79
Tabla 23. Cantidad de agregados	79
Tabla 24. Corrección de mezcla por agua agregada	80
Tabla 25. Cantidades de material para mezcla patrón	82
Tabla 26. Cantidades de material para cada mezcla con las diferentes dosificaciones	82
Tabla 27. Resistencias a la flexión de todos los adoquines fallados	86
Tabla 28. Datos de % de absorción de los adoquines	89
Tabla 29. Costos indirectos del proceso de elaboración de adoquines	91
Tabla 30. Costos directos de materiales e insumos consumibles - AD. CONV	92
Tabla 31. Diseño de mezcla de 1m ³ de concreto con reemplazo de 10% de cemento por ceniza	93
Tabla 32. Costos directos de materiales e insumos consumibles - AD. ECO	94
Tabla 33. Costo de elaboración de 1m ³ de mezcla para adoquines ecológicos y adoquines convencionales realizados en la ciudad de Valledupar	97

AMBIENTAL Y SANITARIA
Tabla 34. Costo de elaboración de 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos y adoquines convencionales realizados en inmediaciones al lugar de procedencia de la ceniza (Termotasajero) 97



VI. LISTA DE FIGURA

Figura 1. ORIGEN DEL CARBON	26
Figura 2. CLASIFICACION DEL CARBON	28
Figura 3. UBICACION GEOGRAFICA DE TERMOTASAJERO	43
Figura 4. VISTA SATELITAL DE LA UBICACION GEOGRAFICA DE TERMOTASAJERO	44
Figura 5. DIMENSIONES DEL ADOQUIN	55
Ilustración 6. Costo de envío de cenizas. Norte de Santander - Valledupar	94
Figura 7. Lavado de agregado fino para prueba de humedad	117
Figura 8. Agregado fino con humedad natural	117
Figura 9. Agregados fino y grueso	117
Figura 10. Peso de agregado grueso	116
Figura 11. Realización de prueba granulométrica de agregado	116
Figura 12. Peso agregado fino	116
Figura 13. Lavado de agregado	116
Figura 14. Ceniza enviada por Termotasajero	117
Figura 15. Apariencia de ceniza volante	117

Figura 16. Proceso de peso del material	117
Figura 17. Proceso de lavado y peso del material	117
Figura 18. Ceniza en la mezcla	118
Figura 19. Agregados y ceniza	118
Figura 20. Proceso de mezclado de los agregados	118
Figura 21. Mezcla final	118
Figura 22. Mezcla en la maquina	119
Figura 23. Distribución de la mezcla en las áreas de cada adoquín	119
Figura 24. Maquina compactando la mezcla en los moldes	119
Figura 25. Adoquines realizados	119
Figura 26. Adoquines húmedos	120
Figura 27. Adoquines resultantes de cada diseño de mezcla	120
Figura 28. Rotulado de planchas	120
Figura 29. Medición de dimensiones de adoquín, 7 días de curado	121
Figura 30. Máquina ensayo a flexión	121
Figura 31. Montaje de adoquín para falla a los 7 días de curado	121
Figura 32. Adoquín fracturado a los 7 días de curado	121
Figura 33. Resultado de Ensayo a los 7 días de curado	122

Figura 34. Resultado de ensayo a los 7 días de curado	122
Figura 35. Medición de dimensiones de especímenes a los 7 días de curado	122
Figura 36. Medición de dimensiones de adoquín a los 7 días de curado	122
Figura 37. Adoquines fracturados a los 7 días de curado	123
Figura 38. Adoquín para someter a falla a flexión a 14 días de curado	124
Figura 39. Adoquín para someter a falla a flexión a los 14 días de curado	124
Figura 40. Adoquín para someter a falla a los 14 días de curado	124
Figura 41. Resultado de falla a flexión a los 14 días de curado	124
Figura 42. Adoquines fracturados a los 14 días de curado	125
Figura 43. Proceso de medición de adoquines	125
Figura 44. Adoquines luego de falla a los 14 días de curado	125
Ilustración 45. Adoquín para someter a falla a los 28 días de curado	126
Ilustración 46. Adoquín fallado a los 28 días de curado	126
Figura 47. Resultado de falla a los 28 días de curado	126
Figura 48. Resultado de falla a los 28 días de curado	126
Figura 49. Apariencia interior final seca del espécimen	127
Figura 50. Fractura de adoquín a los 28 días	127
Figura 51. Adoquines fracturados a los 28 días de curado	127

Figura 52. Peso de espécimen	128
Figura 53. Adoquines antes de sumergir en el agua	128
Figura 54. Especímenes sumergidos en el agua para prueba de absorción	128
Figura 55. Adoquín húmedo, luego de 24 horas de sumergido	128
Figura 56. Peso de adoquín	128
Figura 57. Apariencia superior de adoquín	128
Figura 58. Apariencia lateral de adoquín	128



VII. LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Abertura del tamiz (mm) vs el % que pasa de la granulometría del agregado fino y los límites establecidos por la NTC 174.	61
Gráfico 2. Abertura del tamiz (mm) vs el % que pasa de la granulometría del agregado grueso y los límites establecidos por la NTC 174.	62
Gráfico 3. Agregados y curva ideal (Fuller)	64
Gráfico 4. Parábolas de agregados, Fuller y Mezcla.....	66
Gráfico 5. Área entre parábolas de Fuller y Mezcla	67
Gráfico 6. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN vs A/C.....	73
Gráfico 7. Resultados de Modulo Rotura a los 7 días de curado	84
Gráfico 8. Modulo Rotura a los 14 días de curado.....	84
Gráfico 9. Modulo Rotura a los 28 días de curado.....	85
Gráfico 10. Resultados a 7, 14 y 28 días.....	87
Gráfico 11. % de Absorción de los adoquines	89
Gráfico 12. Gráfica comparativa de costos de 1m3 de mezcla para elaborar adoquines.....	98

INTRODUCCIÓN

Debido a los residuos que se originan diariamente en las industrias generadoras de electricidad a partir de la quema de combustibles fósiles, ha surgido la necesidad de hallar una manera de reutilizarlos. La implementación de estos residuos en la fabricación de materiales destinados a la construcción ha entrado en consideración a lo largo del tiempo.

Los adoquines son un material que suele utilizarse en la construcción de pavimentos articulados y son una herramienta muy favorable ya que este a menudo cuenta con una larga vida útil y el mantenimiento que debe hacerse es exiguo.

A través del tiempo se han implementado materiales diferentes a los normalmente integrados en la elaboración del concreto, a estos suelen referirse como aditivos, estos a menudo pueden darle cierta mejora en cuanto a los resultados finales de las mezclas de concreto, algunos aditivos suelen darles a los materiales mucha más resistencia de la que tendrían con los materiales comúnmente utilizados, algunos aceleran o en su defecto retardan su fraguado.

Los aditivos en estas mezclas de concreto no son generalmente utilizados debido a la creencia de que podrían apuntar hacia un mayor costo en cuanto a materiales y, por lo tanto, queda totalmente descartada su implementación, pero al hacer referencia a la utilización de un aditivo que es material de desecho diariamente de las termoeléctricas, sería un caso que brinda doble beneficio ya que con la intención de reducir la cantidad del cemento utilizado e incorporar algunos residuos industriales a los procesos productivos se estudia la viabilidad de utilizar cenizas volantes de carbón, esto equivaldría a menor material particulado arrojado al aire y menor utilización de suelo para la disposición de estas cenizas producto de la combustión del carbón. Lo cual, además de contribuir al medio ambiente, puede generar una disminución en cuanto al dinero invertido.

Por consiguiente, uno de los objetivos principales y más importantes de este proyecto es aprovechar esta ceniza residuo de la combustión del carbón en las centrales termoeléctricas, para

AMBIENTAL Y SANITARIA

la confección de un adoquín del cual se espera que tenga una estructura mejorada en comparación al adoquín que es fabricado de manera convencional.



**1. APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS DE CARBÓN GENERADAS EN LA
CENTRAL TERMOTASAJERO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES
ECOLOGICOS EN VALLEDUPAR, CESAR O EN INMEDIACIONES DE LA
CENTRAL TERMICA, TERMOTASAJERO.**



2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ceniza volante es el residuo de la combustión del carbón usado en las centrales termoeléctricas. Las cenizas del carbón se producen en grandes cantidades en todo el mundo. Estas, a su vez, son unos contaminantes extremadamente agresivos con el medio ambiente. Se trata de uno de los desechos más importantes en Europa, donde alcanza las 100 megatoneladas (millón de toneladas) al año (mt/año), en Colombia se producen aproximadamente 600 KTon/año de ceniza volante de calidad variable (esto equivale a 600.000 Toneladas de cenizas volantes cada año), en su gran mayoría no se está aprovechando adecuadamente y se constituye en un problema ambiental.

La eliminación de las cenizas volátiles es de suma importancia ya que estas solo están siendo depositadas en patios de acopio, las cenizas producidas por la combustión del carbón pueden tener consecuencias graves para el medio ambiente, ya que en ellas se concentran decenas de metales pesados presentes de forma natural, entre ellos agentes cancerígenos y toxinas como arsénico, cadmio, plomo, vanadio y cromo, así como radón y uranio radiactivos. Estos metales son los mayores riesgos sanitarios de las cenizas de carbón. Estas cenizas al ser hidratadas debido a cualquier factor, podrían filtrarse por el suelo y contaminar las aguas subterráneas. Además de que gran parte de esta ceniza es tan fina que puede volatilizarse y ser respirada, llegando así a los pulmones y provocando severas enfermedades respiratorias, lo que hace necesario su tratamiento o reutilización.

El 22 de diciembre de 2008, tuvo lugar un devastador derrame industrial, cuando en la ciudad de Kingston, Tennessee, se quebró el dique de un estanque de la central eléctrica Tennessee Valley Authority (TVA), el cual almacenaba un billón de galones de lodo de cenizas. El accidente provocó que una ola gris de cenizas arrojara grandes porciones de terreno con hasta seis pies de cenizas, destruyera propiedades y contaminara el río Emory – un tributario del río Tennessee – con una variedad de tóxicos como arsénico, cadmio y cromo.

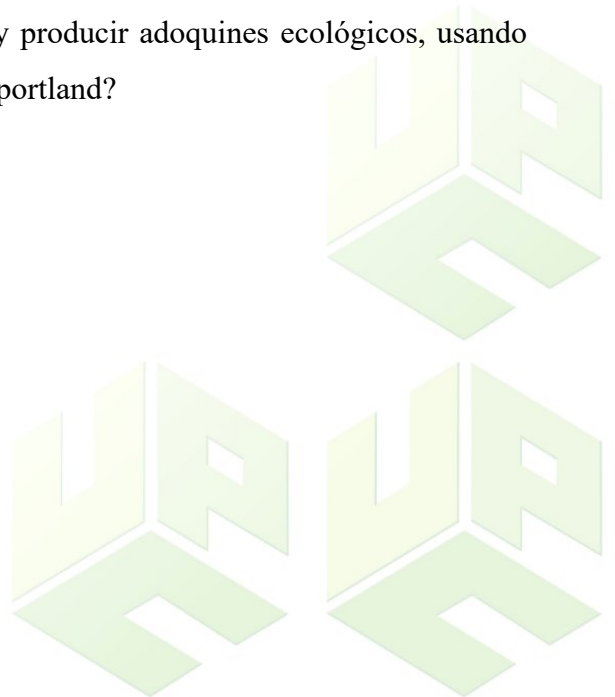
El derrame inicial no provocó lesiones ni muertes, pero 30 de los empleados de una empresa de ingeniería contratada por TVA para limpiar el derrame desarrollaron enfermedades, como cáncer de cerebro, cáncer de pulmón, leucemia, enfermedades respiratorias crónicas y cardiopatía coronaria a consecuencia de su exposición prolongada al material.

Una posible solución o disminución de la magnitud del impacto provocado por estas cenizas en el ambiente podría ser la reutilización de este residuo sólido en el ámbito de la construcción, implementándolas como parte de un aditivo con propiedades conglomerantes.

Las cenizas que proceden de la combustión de combustibles fósiles utilizados en las centrales termoeléctricas podrían sustituir parte de la proporción total en masa de cemento que se utiliza en la elaboración de adoquines, lo cual presenta un gran avance en el sector de la ecoarquitectura ya que se trata de un material ecológicamente sostenible.

2.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son los beneficios ofrecidos al diseñar y producir adoquines ecológicos, usando cenizas del carbón como reemplazo parcial del cemento portland?



3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se lleva a cabo para tratar de mitigar el daño que están sufriendo los suelos y a su vez los seres humanos por la contaminación que se está presentando en el medio ambiente, debido a que no se les da uso a este residuo que se genera a diario en las centrales termoeléctricas de Colombia, generando así una problemática ambiental y social; aquí se plantean algunas de las diferentes razones de por qué es tan perjudicial que las cenizas frutos del proceso que se da lugar en estas centrales térmicas no tengan un ciclo de reciclaje.

En Colombia se han hecho investigaciones para la aplicación de la ceniza residuo de la combustión del carbón como reemplazo de algún aditivo en la composición de materiales destinados a la construcción, teniendo como finalidad tratar de disminuir la problemática ambiental que ocasionan las mismas; para que las cenizas tengan un buen aprovechamiento, deben representar beneficios en cuanto a la estructura y durabilidad del material, economía en el proceso de elaboración y no afectar negativamente al medio ambiente.

La contaminación ambiental provocada por la emisión de las cenizas de carbón abarca la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, esto debido a la lixiviación de metales pesados contenidos en las cenizas; contaminación atmosférica por emisiones de partículas a raíz del conocido “material pulverulento”; y la contaminación de suelos por lixiviación y arrastre de metales pesados y otros compuestos.

El llevar a cabo este proyecto se origina de la necesidad de reutilizar las cenizas volantes, ya que son grandes contaminantes al medio natural alterando así negativamente a éste y a la salud humana ocasionando efectos detrimentales en esta; pueden ocasionar o agravar enfermedades cardíacas, respiratorias, cancerígenas, entre otras; es necesario dar a conocer lo peligroso que puede llegar a ser el material particulado proveniente de la combustión del carbón, emitido al aire e incluso al suelo, para saber la magnitud de importancia que tiene la realización del proyecto.

Debido a los problemas de contaminación que se presentan surgió algo llamado arquitectura ambientalmente consciente o arquitectura sostenible, la cual consiste en el uso de materias primas y energía renovable, reduce la cantidad de materia y energía utilizada para la explotación y extracción de los recursos naturales y el reciclaje de los residuos.

Se plantea una alternativa de solución mediante un proceso diseñado para que las centrales termoeléctricas puedan optar por la reutilización de estas cenizas y no llevarlas a patios de acopio, lo cual puede generar problemas de salud como enfermedades asociadas al consumo de agua que ha sido contaminada, por medio de la filtración del suelo, con los distintos componentes de las cenizas. El proceso que se llevará a cabo dará lugar a la creación de un adoquín ecológico que será amigable con el medio ambiente y difiere de los convencionales, tanto en el proceso de elaboración que requieren, como en la resistencia material.

El interés económico que puede proceder a la puesta en marcha y éxito del proyecto es que se presenta una disminución en la cantidad de cemento usualmente utilizado para la confección de los adoquines convencionales, derivándose así una menor inversión en materia prima; y con la experimentación de las distintas proporciones, se pueden establecer las dosificaciones óptimas para que las propiedades de los adoquines sean las adecuadas.

El interés por el éxito del proyecto se deriva de la preocupación existente actualmente en cuanto a las emisiones de material particulado al ambiente y la preservación del buen estado de los cuerpos de agua ya sean superficiales o subterráneos, debido a que de una u otra manera la acumulación de este residuo puede resultar perjudicial, ya sea en un corto o largo lapso.

4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

4.2.OBJETIVO GENERAL

Aprovechar las cenizas de carbón generadas en las centrales termoeléctricas para implementarlas en la producción de adoquines ecológicos.

4.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las cenizas producidas por la central termoeléctrica.
- Elaborar un adoquín ecológico con las dosificaciones apropiadas de cenizas.
- Evaluar la eficiencia de los adoquines ecológicos como alternativa de uso en la construcción, con respecto a la eficiencia de los adoquines convencionales.
- Analizar la diferencia entre beneficios y costos de una mezcla para adoquines convencionales y adoquines ecológicos.



5. MARCO REFERENCIAL

5.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Torres (2018), desarrolló la investigación titulada VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN MORTEROS INDUSTRIALES; para optar el título de Doctor, en la Universidad de Córdoba, con la finalidad de considerar nuevos usos para áridos que se puedan reciclar. Esta investigación se llevó a cabo en 4 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, el autor desarrolló los áridos reciclados cerámicos finamente triturados como filler en morteros. **ETAPA 2:** en segunda instancia el autor elaboró un uso combinado de cenizas volantes no conformes y áridos reciclados mixtos en morteros. **ETAPA 3:** en tercera instancia el autor elaboró aditivos para mortero con áridos reciclados. **ETAPA 4:** por último, un uso combinado de cenizas volantes de biomasa y áridos reciclados mixtos en morteros.

Los productos de esta investigación fueron realizar dos clases de morteros, uno de baja resistencia (LSM) y otro de alta resistencia (HSM); y hacer verdadera la hipótesis de que los áridos que se reciclen pueden reemplazar perfectamente a los áridos naturales. Los resultados de la investigación fueron que los morteros hechos con un árido reciclado mixto procedente de la demolición de una tabiquería de ladrillo cerámico finamente triturado (FRMA) presentan una mayor densidad. El FRMA tiene una granulometría más continua y mayor porcentaje de finos que el FNA (áridos naturales), por tanto, con el uso de FRMA se consigue una mezcla más compacta. También se observan unos valores más altos para la clase HSM (morteros de alta resistencia), esto es debido a que los morteros de alta resistencia poseen mayor contenido de cemento, el cual tiene una mayor densidad que el resto de los materiales.

Los aportes directos al presente estudio son darle fundamento a la hipótesis planteada en la investigación de que se puede reemplazar cierta proporción de cemento por ceniza. Esta

investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que en el presente estudio se trata sobre el reemplazo parcial del cemento usado normalmente en un adoquín convencional por la ceniza que es producto de la combustión del carbón en las centrales termoeléctricas. (TORRES GOMEZ, 2018)

Bedoya (2015), desarrolló la investigación titulada EFECTO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS Y CENIZAS DE CARBÓN EN LA DURABILIDAD DE UN MORTERO ECOLÓGICO PARA SU APLICACIÓN EN ARRECIFES ARTIFICIALES; para optar el título de Magíster en Ingeniería Materiales y Procesos, en la Universidad Nacional de Colombia, con la finalidad de proponer un módulo experimental de arrecife artificial que permita la utilización del mortero ecológico como sustrato para el desarrollo de arrecifes. Esta investigación se llevó a cabo en 3 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, el autor desarrolló la parte de reconocer y caracterizar las materias primas para la fabricación de un mortero ecológico. **ETAPA 2:** en segunda instancia el autor elaboró la parte de relacionar la incidencia de materiales reciclados (agregados y cenizas de carbón) sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero. **ETAPA 3:** por último, propuso un módulo experimental de arrecife artificial que permite la utilización del mortero ecológico como sustrato para el desarrollo de arrecifes.

Los productos de esta investigación fueron morteros aplicados para la creación de arrecifes artificiales con condiciones óptimas de durabilidad y resistencia. A través del resultado de la investigación fue posible evidenciar el uso de morteros ecológicos elaborados con materiales alternativos como Cenizas de carbón y Agregados reciclados, para su uso en estructuras estables. Por lo tanto, este material se presenta como una herramienta para el desarrollo de propuestas de conservación a través de la construcción de arrecifes artificiales en la zona del Caribe Colombiano, ya que bajo las condiciones particulares de este lugar se evaluaron dichos morteros.

Los aportes directos al presente estudio son sugerencias en cuanto a las proporciones óptimas de áridos naturales usadas, este plantea el uso de mortero elaborado con 30% de CC (cemento) en su material cementante y 70% de AR (áridos reciclados) en la proporción de los agregados con relación de 1:2, ya que cumple con valores adecuados de resistencia y colonización para esta aplicación, que es la de arrecifes artificiales. Esta investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que se parte de una aplicación a escala de ciertas proporciones de aditivos a la mezcla de mortero que se hace para arrecifes artificiales, aunque sea aplicado para medios diferentes ya que va aplicado al océano y a una exposición constante de agua salada, es de gran relevancia debido a la similitud en composición físico-química. (BEDOYA GUTIERREZ, 2015)

Chávez & Guerra (2015), desarrollaron la investigación titulada PRODUCCIÓN, PROPIEDADES Y USOS DE LOS RESIDUOS DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN DE TERMOTASAJERO; para optar el título de Ingeniería Civil, en la Universidad Santo Tomás, con la finalidad de estudiar las propiedades de las cenizas volantes para poder generar la composición química en el Clinker. Esta investigación se llevó a cabo en 4 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, el autor Caracterizó físicamente y químicamente las cenizas volantes de la central termoeléctrica Termotasajero. **ETAPA 2:** en segunda instancia el autor desarrolló la revisión del estado del arte de las cenizas volantes y planteó sus usos pertinentes en la construcción de obras civiles. **ETAPA 3:** en tercera instancia el autor elaboró cuadros comparativos de propiedades físico-químicas de las cenizas volantes de las plantas termoeléctricas Termozipa, Termopaipa, Termoguajira y Termotasajero. **ETAPA 4:** por último, Explicó y clasificó los parámetros de las cenizas volantes y las muestras de carbón que obtuvieron en la planta Termotasajero. Los productos de esta investigación fueron un aporte a nuestro proyecto en cuanto a nuestras bases en fuentes fidedignas. Los resultados de la investigación fueron favorables en reemplazo de cemento por ceniza a 10 % y edades mayores; sin embargo, se puede afirmar que el contenido de inquemados en las cenizas son los causantes de la disminución de la resistencia a

compresión en todos los casos. Al aumentar el contenido de ceniza en la mezcla, se incrementa la presencia de los inquemados, reduciendo la resistencia a la compresión de los especímenes.

Los aportes directos al presente estudio son la demostración de ciertas propiedades cementantes. Esta investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que demuestran los componentes y estructuras fisicoquímicas de las cenizas que se generan en la misma termoeléctrica que tomamos como muestra. (CHAVEZ VELASQUEZ & GUERRA MAESTRE, 2015)

Guerrero, Jiménez & Peña (2014) desarrollaron la investigación titulada VALORIZACIÓN DE CENIZAS MEDIANTE TRATAMIENTO HIDROTERMAL PARA SU APLICACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN; para contribuir a una investigación al Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, con la finalidad de valorizar las cenizas en el campo de la construcción. Esta investigación se llevó a cabo en 3 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, los autores estudiaron la ceniza Ro como material puzolanico.

ETAPA 2: en segunda instancia los autores determinaron la actividad puzolanica que contenían las cenizas. **ETAPA 3:** por último, se emplearon las cenizas Ro como sustitución parcial del cemento. Los productos de esta investigación fueron la reutilización de un residuo que se genera diariamente en las industrias que trabajan con materiales los cuales al quemarlos producen cenizas.

Los aportes directos al presente estudio son la confiabilidad de que las cenizas son un material puzolanico que puede actuar como material cementante hasta cierta medida y puede reemplazar proporciones de cemento los cuales le permitan a la mezcla tener una estructura mejorada o parecida a como si se hubiese utilizado la totalidad inicial de cemento. Esta investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que nos demuestra el comportamiento de ciertas cenizas al hidratarse. (GUERRERO BUSTOS, 2014)

Cabo (2011) desarrolló la investigación titulada LADRILLO ECOLÓGICO COMO MATERIAL SOSTENIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN; para optar el título de Ingeniero Técnico Agrícola en Explotaciones Agropecuarias, en la Universidad Pública de Navarra, con la finalidad de realizar un nuevo material constructivo, el cual denominaron ecoladrillo. Esta investigación se llevó a cabo en 4 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, el autor desarrolló el efecto de contenido de humedad óptimo y de la densidad seca máxima.

ETAPA 2: en segunda instancia el autor elaboró algunos ensayos en los cuales se tenían en cuenta las combinaciones de las proporciones de los aditivos comerciales. **ETAPA 3:** en tercera instancia el autor elaboró otros ensayos, pero esta vez teniendo en cuenta las proporciones de las cenizas de cascarilla de arroz. **ETAPA 4:** por último, en esta última etapa de la investigación, se añaden las cascarillas de arroz que completarán a la cal hidráulica y a las cenizas de cáscara de arroz, en la combinación que será resultante del ecoladrillo definitivo propuesto. Los productos de esta investigación fueron satisfactorios ya que cumplen con cada uno de los parámetros que se habían proyectado desde un principio en la investigación. Los resultados de la investigación fueron un ecoladrillo que está hecho con un suelo arcilloso, marga gris, 5% de cal hidráulica natural, 8% de cenizas de cáscaras de arroz residuo de la industria de la biomasa, y un 5% de cascarillas de arroz subproducto de la cosecha del mismo.

Los aportes directos al presente estudio son la confiabilidad de que si es posible obtener un adoquín ecológico a base de el remplazo de una cierta proporción del cemento que compone el adoquín. Esta investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que la metodología planteada en el proyecto puede sugerirse como guía para la estructuración de la metodología del presente. (CABO LAGUNA, 2011)

Thenoux (2010), desarrolló la investigación titulada ADOFALTOS: ADOQUINES PARA PAVIMENTOS ARTICULADOS FABRICADOS CON MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON EMULSIONES Y CENIZA FBC; Se realizó con el fin de aportar una nueva investigación, en la Universidad Pontificia Católica de Chile, con la finalidad de utilizar la ceniza producto del lecho fluidizado como materia prima para la fabricación de adoquines de asfalto. Esta investigación se llevó a cabo en 5 etapas; estas fueron:

ETAPA 1: en esta fase de la investigación, el autor desarrolló un modelo de negocios para introducir los adofaltos en el mercado actual.

ETAPA 2: en segunda instancia el autor diseñó un procedimiento para la fabricación de los adofaltos. **ETAPA 3:** en tercera instancia el autor estudió el comportamiento de los adofaltos elaborados. **ETAPA 4:** en cuarta instancia el autor elaboró emulsiones asfálticas que fueron compatibles con las cenizas de lecho fluidizado. **ETAPA 5:** por último, desarrollo en si el procedimiento para diseñar las mezclas asfálticas en frío con las emulsiones creadas y las cenizas del lecho fluidizado. Los productos de esta investigación fueron maximizando las propiedades requeridas para la composición y estructura de un adoquín y minimizar el costo de estos. Los resultados de la investigación fueron la determinación de las mezclas ideales para la realización del adofalto y producción a pequeña escala de adoquines de forma artesanal.

Los aportes directos al presente estudio son protocolos para el diseño de mezclas asfálticas. Esta investigación es necesaria porque es un estudio pionero debido a que se trabaja una metodología que puede servir de guía para la presente investigación e incluso una manera de demostración de veracidad en lo que respecta a la realización del proyecto. (THENOUX ZEBALLOS, 2010)

En el año 2006 según los datos suministrados por la UPME se ha estimado que aproximadamente 123 kilotoneladas (mil toneladas) de cenizas son generadas por parte de las plantas generadoras de energía eléctrica a base de carbón. (HERRERA TORRES, 2007)¹

5.2.1. Mineral

Los minerales son producidos mediante un material que se encuentra inicialmente en un estado natural y llegan al suelo gracias a la erosión. Se pueden encontrar los minerales primarios los cuales son los que se mantienen sin que su composición original haya sido alterada. Entre estos se encuentran minerales como el cuarzo, el cual es uno de los minerales bastante resistentes a la erosión; y los minerales secundarios que son los producidos mediante reacciones erosionantes con el aire y el agua y forman óxidos e hidróxidos de los minerales primarios. Los silicatos tienen una de las reacciones de hidrólisis más importantes, ya que por medio de esta reacción pueden formar arcillas. Las arcillas, son partículas muy pequeñas compuestas de silicio, aluminio, oxígeno e hidrógeno. Las arcillas tienen cuatro clasificaciones: caolinitas, montmorillonitas, ilitas y arcillas amorfas. Las primeras tres poseen estructura cristalina. La estructura básica de una arcilla es una micela compuesta por capas de silicio y aluminio ordenadas alternadamente con átomos de oxígeno en una estructura similar a la de un sándwich.² (DAVIS & MASTEN, 2005)

El ciclo de la formación de las rocas comienza en el núcleo del planeta que está fundido: el magma. Las rocas ígneas, antepasados de todas las demás rocas, alguna vez fueron parte de una masa hirviente y líquida de magma. La formación de las rocas ígneas extrusivas se da a través de

¹ López, C., & Sánchez, M, (2007). Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. Proyecto de grado. Universidad de la Salle, Bogotá.

² Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

AMBIENTAL Y SANITARIA

la lava hirviente que fluye desde un volcán. A su vez, las intrusivas se enfrían a kilómetros por debajo de la superficie terrestre y quedan expuestas solo después de una fuerte erosión.³ (DAVIS & MASTEN, 2005)

5.2.2. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se componen de restos reaccumulados de otras rocas; se forman de partes minerales que van siendo depositados por el viento, el agua o hielo y luego del depósito proceden a ser cementados; pueden formarse también por la actividad natural de ciertos organismos o por la precipitación de sales disueltas y posteriormente se agrupan por parte de la deposición que induce el agua, hielo o el viento.⁴ (IRIONDO, 2009)

5.2.3. Recurso Carbón

Los recursos que pueden sustituirse tras periodos cortos como años, décadas o incluso siglos, como mucho, mediante cultivos, bosques y pastizales se denominan renovables. Los recursos no renovables como los depósitos de hierro y cobre, se forman durante los periodos geológicos; en función de las necesidades humanas, una vez agotado el yacimiento su desaparición es permanente, como lo es el caso del carbón.⁵ (Reservado, Carbón, s.f.)

Cerca del 2% de la energía solar que llega a la tierra es absorbida por las plantas; por medio del proceso que realizan, llamado fotosíntesis, utilizan la energía proveniente del sol para sintetizar biomasa. Por lo general, la energía solar almacenada en esta materia orgánica es dispersada por medio de la oxidación y disminuye poco después de que la planta muere; pero cuando el material que queda de este vegetal cae en un entorno pantanoso y queda bajo sedimentos, más de estos van

³ Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

⁴ Iriondo, M. (2009). Introducción a la Geología (2° edición). Editorial Brujas, Argentina.

⁵ EducarChile (On-line). Disponible en: <https://www.aprendeconenergia.cl/carbon/>

AMBIENTAL Y SANITARIA

quedando depositados encima de este. Las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica, como la celulosa, en carbono, mediante un proceso llamado carbonización y también son productos de este proceso el CO₂ y el CH₄, gases que son almacenados en las fracturas de las rocas y son peligrosas en el proceso de la explotación de carbón ya que se forman bolsas de estos gases altamente reactivos. Si se inhibe el proceso de oxidación a una gruesa capa de materia vegetal en putrefacción sepultada bajo otra capa del mismo material o sedimento, se lo conoce como turba. Está se utiliza cómo combustible, pero no es carbón. ⁶ (DAVIS & MASTEN, 2005)

A Medida que la turba se va quedando sepultada bajo un velo cada vez más grueso de materia vegetal en descomposición y sedimentos, está se comprime y su temperatura aumenta. Además, de que hay una separación de agua, hidrógeno y oxígeno, por lo que la turba se vuelve más seca y rica en carbono. Con el tiempo se convierte en lignito, que es el primer carbón que se forma y es considerado un carbón de baja calidad.⁷

El aumento en factores como la presión y el calor aplicados durante un tiempo geológico, transforman el lignito en bituminoso, que es un carbón suave y luego en antracita, la cual es un carbón fuerte. El carbón de antracita común es conformado por un 95% de carbono; por lo tanto, es el de mayor calidad. ⁸ (URIBE, 1986)

Se ha estimado que se necesitan cerca de 30.000 años de crecimiento vegetal continuo para que se forme una capa de carbón con 1m de espesor. Aunque se ha formado carbón durante largos

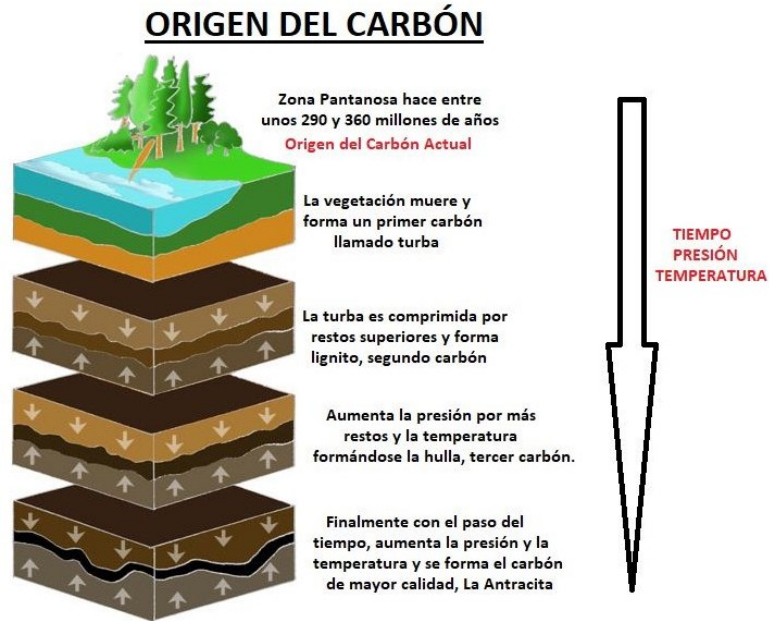
^{6 & 7} Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

⁷ Uribe, C. (1986). Introducción a la Tecnología del Carbón Origen Composición, Propiedades, Clasificación. INGEOMINAS.

AMBIENTAL Y SANITARIA

lapsos, las cantidades más importantes se formaron durante el periodo carbonífero, hace 290 a 360 millones de años aproximadamente.⁹ (IRIONDO, 2009)

Figura 1. ORIGEN DEL CARBÓN



Fuente: areaciencias.¹⁰ (Areaciencias, s.f.)

5.2.4. El periodo Carbonífero

El periodo Carbonífero fue un periodo en el cual se desarrollaron los yacimientos de carbón más importantes del mundo, este pertenece a la era paleozoica que abarca desde el final del

⁹ Iriondo, M. (2009). Introducción a la Geología (2° edición). Editorial Brujas, Argentina.

¹⁰ (Areaciencias, s.f.). <https://www.areaciencias.com/geologia/carbon/>

AMBIENTAL Y SANITARIA

Devónico (hace 359 millones de años) hasta el principio del Pérmico (hace 299 millones de años).¹¹
(Reservado, s.f.)

5.2.5. Carbón

El lignito se explota a cielo abierto, quitando la tierra que se encuentra depositada sobre el carbón mediante excavadoras y luego se realiza la extracción. Este se emplea generalmente como combustibles ya que poseen un bajo poder calorífico.¹² (CORTES, 2005)

El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente por una fracción orgánica, que son los macerales, y en menor proporción por sustancias minerales, que contienen asimismo agua y gases en poros microscópicos. Estos macerales resultan de la formación y condensación de anillos polinucleares carbocíclicos, donde el carbono, hidrógeno y oxígeno son los elementos fundamentales, y el azufre y nitrógeno son complementarios.¹³ (Manual de reutilización de residuos de la industria minera, 1995)

El manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica (1995), señala que: “El petróleo y el carbón son las fuentes de energía más importantes y que además son indispensables como materia prima para la industria química.”¹⁴
(Manual de reutilización de residuos de la industria minera, 1995)

¹¹ EcuRed (On-line). Disponible en: https://www.ecured.cu/Per%C3%ADodo_Carbon%C3%ADfero

¹² Cortes, V. (2005). Carbón.

¹³ & ¹⁴ INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA, 1995. Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. Imprime Rivadeneyra, S.A.

AMBIENTAL Y SANITARIA

Con respecto al Glosario de la agencia nacional de minería (pg, 26) el carbón se define como: Una roca sedimentaria de fácil combustión, color negro que se forma a partir de la compactación por presión y calor de restos de plantas que son químicamente alteradas durante el tiempo geológico. Para clasificar el carbón se parte de qué tipo eran las plantas, el grado de metamorfismo y la cantidad de impurezas que posee.¹⁵ (Energía, 2003)

Clasificación del carbón

El carbón se clasifica según su rango en:

Figura 2. CLASIFICACION DEL CARBON



Fuente: areaciencias.¹⁶ (Areaciencias, 2021)

¹⁵Glosario Técnico Minero. (2003). Bogotá. Ministerio de minas y energía. Recuperado de: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>

¹⁶ (Areaciencias, s.f.). <https://www.areaciencias.com/geologia/carbon/>

Turba: Posee un 50% en carbono y su capacidad calorífica es de 4000 Kcal/kg.

Lignito: Posee un 70% en carbono y su capacidad calorífica es de 5000 Kcal/kg.

Hulla: Posee un 80% de carbono y su capacidad calorífica es de 7000 Kcal/kg.

Antracita: Posee un 95% de carbono y su capacidad calorífica es de 8000 Kcal/kg.¹⁷
(Reservado, Carbón, s.f.)

El precio del carbón es determinado por su contenido en cenizas y, por lo tanto, el uso final y tratamiento al que es sometido luego de su comercialización también dependen de este factor.¹⁸
(PEÑA URUEÑA, 2011)

5.2.6. Centrales térmicas de generación de energía eléctrica

La mayor parte de las necesidades humanas, en cuanto a energía se refiere, se solventaron, hasta hace unos 300 años aproximadamente, por medio de la fuerza del agua, el viento, la madera y otros materiales orgánicos que son combustibles, como los desperdicios agrícolas y el estiércol que en la actualidad están determinados como biomasa. Con la llegada de la revolución industrial, a finales de siglo XVIII y principios del siglo XIX, la fuerza del agua como factor de producción de energía eléctrica continuó siendo importante, cuyo mecanismo se implementa en las conocidas “hidroeléctricas”; pero también comenzaron a emplearse a gran escala los combustibles sólidos,

¹⁷ E-ducativa. Recuperado de: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2632/html/231_carbn.html

¹⁸ Peña, M. (2011). Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión Gamma-Gamma. Universidad Nacional de Colombia.

entre estos principalmente se encuentra el carbón, el cual es uno de los materiales que se implementan en los procesos de las termoeléctricas en la actualidad.¹⁹ (DAVIS & MASTEN, 2005)

La quema de los combustibles fósiles produce una serie de contaminantes hacia el aire, cómo lo pueden ser: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y material particulado. La cantidad de azufre en el combustible es directamente proporcional a la cantidad de dióxido de azufre que se produce en su proceso de combustión. El carbón, contiene menos azufre y con frecuencia se elige como sustituto de algunos otros combustibles fósiles con el fin de reducir las emisiones de SO₂. El gas natural no contiene azufre y, por ende, no lo emite. Cómo las proporciones de ceniza que quedan como residuo de la combustión del carbón son bastante altas, este pasaría a ser una considerable fuente de emisión de material particulado hacia la atmósfera, estas cenizas son la parte de la materia mineral que no se quema. El petróleo produce menos cenizas y emisiones. El gas natural no genera cenizas ni emisiones. Los tres elementos combustibles emiten óxido de nitrógeno debido a que la reacción química no depende del contenido de nitrógeno en el combustible. Otros contaminantes que provienen de los combustibles fósiles están los metales tóxicos, como el mercurio, el cual se encuentra contenido en pequeñas cantidades en el carbón.²⁰ (DAVIS & MASTEN, 2005)

Si bien la producción de energía nuclear no emite contaminantes de aire, el combustible utilizado es extremadamente radiactivo y representa un problema en cuanto a la eliminación de desperdicios sólidos que todavía está sin resolver. El volumen total de ceniza de carbón es otro importante problema de eliminación de desperdicios sólidos. Cerca de 30% de las cenizas se asienta

¹⁹ Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

²⁰ Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

como ceniza de fondo en la cámara de combustión de la planta de energía. El resto, la ceniza volátil, debe retenerla el equipo para controlar a la contaminación del aire.²¹ (S.A., 1999)

Según René de la Pedraja Toman, en el escrito PETRÓLEO, ELECTRICIDAD, CARBÓN Y POLÍTICA EN COLOMBIA, (1951). Las termoeléctricas aparecieron en Colombia luego de 1890, aunque tuvieron un impacto significativo en el consumo del carbón a partir de la década de 1940 y la presión de crear o construir nuevas termoeléctricas fue mayor cuando la gran parte de esas empresas de energía pasaron a ser propiedad del estado.²² (PEDRAJA, 1951)

En el proceso que corresponde a la producción de la energía se implementan máquinas que aprovechan los recursos tales como el agua, aire, combustible o la luz del sol para la generación o producción energía eléctrica. La energía que se obtiene por medio de la naturaleza, sin esta ser transformada, se le llama energía primaria; y la que se obtiene mediante combustibles que han sido convertidos o transformados, se le llama energía secundaria.²³ (DAVIS & MASTEN, 2005)

En las centrales termoeléctricas básicamente aprovechan el calor generado por parte del proceso de la combustión. Está energía térmica la convierten en trabajo por medio de una turbina de vapor o motores reciprocantes, luego accionan mecánicamente un generador acoplado al eje de la turbina el cual se encarga de convertir este trabajo en energía eléctrica.²⁴ (S.A., 1999)

²¹ AENE CONSULTORIAS S.A, (1999). MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración, parte aire y ruido.

²² Pedraja, R. (1951). Petróleo, Electricidad, Carbón y política en Colombia.

²³ Davis, M., & Masten, S, (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. Translated from the third English Edition of principles of environmental engineering and science.

²⁴ AENE CONSULTORIAS S.A. (1999). MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración, parte aire y ruido.

AMBIENTAL Y SANITARIA

Es preciso conocer los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, halógenos y fósforo en el residuo, así como el contenido de humedad para determinar los requisitos estequiométricos del aire de combustión y para pronosticar el flujo y la composición de los gases de combustión. En general, las condiciones reales de incineración requieren un exceso de oxígeno para aumentar la formación de productos de combustión completa (PCC) y reducir los productos de la combustión incompleta (PCI).²⁵ (AEVERSU)

Se originan básicamente dos tipos de residuos: las cenizas volantes y las cenizas de escoria, diferenciadas entre sí por el tamaño, el cual las caracteriza. Las más finas (característica predominante de las cenizas volantes), son obtenidas por la precipitación electrostática del polvo suspendido que está incluido en los gases que son originados también en el proceso de combustión; mientras que las más gruesas (característica de las cenizas de escoria), caen al fondo por la acción de la gravedad. Estas cenizas pueden ser extraídas de los filtros, con agua, por medio de su arrastre.²⁶ (CEDEX, 2011)

5.2.7. Cenizas volantes

En los últimos años, las cenizas volantes han sido tema de investigación, ya sea como materia prima de diferentes productos o para elucidar problemas industriales, como escorificaciones y fusiones parciales o totales, desde un punto de vista fisicoquímico y de acuerdo con las condiciones donde se realizan los procesos térmicos.²⁷ (VELASQUEZ, DE LA CRUZ, SANCHEZ, & MARIN, 2007)

²⁵ AEVERSU. Asociación Empresarial Valorización R.S.U. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Gobierno de España.

²⁶ CEDEX. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011). (On-line) Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/>

²⁷ Velásquez, L., De la Cruz, J., Sánchez, J., Marín, M. (2007). Escuela de Procesos y Energía, Universidad Nacional de Colombia del Centro. Tomado de: Investigaciones del Carbón, Universidad Nacional de Colombia, (1996).

AMBIENTAL Y SANITARIA

El uso de las cenizas volantes puede contribuir al alivio del problema de disposición y en consecuencia acabar con el impacto ambiental que generan. Sin embargo, si contienen un alto contenido de inquemados, impide su utilización ya que las caracteriza como de baja calidad para uso en el ramo de la construcción.²⁸ (VELASQUEZ, DE LA CRUZ, SANCHEZ, & MARIN, 2007)

La separación de los inquemados mejora la calidad de las cenizas lo cual facilita su utilización y además ofrece un residuo carbonoso que puede utilizarse como combustible o como precursor potencial para la producción de un carbón activado económico y competitivo en el mercado, ya que presenta beneficios energéticos y económicos.²⁹ (VELASQUEZ, DE LA CRUZ, SANCHEZ, & MARIN, 2007)

Según el Glosario del Ministerio de Minas y Energía, ceniza, se define como: un residuo inorgánico que resulta de la combustión de ciertos materiales.³⁰ (Energía, 2003)

En el comercio de la pulverización del carbón, la cantidad de las cenizas juega un rol importante en la selección del equipo de pulverización, dependiendo de la potencia del equipo para moler el carbón, esto a su vez determina el costo del proceso.³¹ (URIBE, 1986)

^{26 & 27} Velásquez, L., De la Cruz, J., Sánchez, J., Marín, M. (2007). Escuela de Procesos y Energía, Universidad Nacional de Colombia del Centro. Tomado de: Investigaciones del Carbón, Universidad Nacional de Colombia, (1996).

²⁹ Glosario Técnico Minero. (2003). Bogotá. Ministerio de minas y energía. Recuperado de: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnn/glosariominero.pdf>

³⁰ Uribe, C. (1986). Introducción a la Tecnología del Carbón. Origen, Composición, Propiedades y Clasificación. INGEOMINAS.

Las cenizas volantes se presentan normalmente como una arena muy fina o un polvo que es suave al tacto y de color gris; las características físicas y la composición de las cenizas volantes son variables que dependen de muchos factores, desde la composición química de estas hasta el sistema por el cual sean retiradas de la central térmica. ³² (CEDEX, 2011)

En general, las cenizas están formadas por las propiedades inorgánicas mezcladas con la parte orgánicas del carbón. Son el residuo inorgánico que es resultado de la incineración del material y se componen de fases inorgánicas, y otras fases que son generadas de materia inorgánica y orgánica del carbón³³ (HUGGINS, 2002)

La materia mineral del carbón consiste en propiedades como sulfatos carbonatos, sulfuros, sulfosales, óxidos e hidróxidos, silicatos, fosfatos, cloruros, entre otros. Esta materia mineral no forma parte de la materia orgánica, ya que son cosas completamente diferentes en cuanto a naturaleza, cantidad y origen; la materia orgánica del carbón serían el carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre; en cuanto a la materia mineral, ésta es la principal fuente de los elementos que conforman las cenizas cuando el carbón es formado en presencia de oxígeno. ³⁴ (VASSILEV, 2002)

Según su contenido en cal hay dos clases de cenizas: Clase F que son el producto de la calcinación de carbón antracita o bituminoso; esta clase contiene pequeñas cantidades de cal, prácticamente inferior al 15% en su composición; luego tenemos la Clase C: que es el producto de

³² CEDEX. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011). (On-line) Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/>

³³ Huggins, F. (2002). Overview of analytical methods for inorganic constituents in coal.

³⁴ Vassilev, J. (2002). Method for Characterization of Inorganic and Mineral Matter in Coal: A Critical Overview. Energy & fuels. Vol. 17.

AMBIENTAL Y SANITARIA

la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, contienen mayor cantidad de cal, entre un 20% y un 30%. ³⁵ (CEDEX, 2011)

Según su composición química hay dos tipos: Cenizas silicoaluminosas, las cuales son de clase F y son las más importantes en cuanto a cantidad conocida y su aprovechamiento, su pH es básico y puede llegar a ser mayor a 10; y las cenizas sulfocálcicas las cuales también pueden llamarse hidráulicas o activas, y suelen presentar un comportamiento diferente a las silicoaluminosas, al contrario de esas, estas tienen un comportamiento aglomerante hidráulico, es decir, que cuando son amasadas con agua sufren reacciones de hidratación, fraguado y endurecimiento, similares a las que tienen lugar en los cementos. ³⁶ (CEDEX, 2011)

Según la concentración de los elementos en: Cenizas volantes silíceas las cuales son un polvo muy fino de partículas esféricas que contienen principalmente dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3); y las cenizas volantes calcáreas las cuales también son un polvo fino, pero estas contienen propiedades hidráulicas o puzolánicas que constan básicamente de óxido de calcio reactivo (CaO), dióxido de silicio reactivo (Fe_2O_3), entre otros compuestos. ³⁷ (CEDEX, 2011)

La finura de las cenizas volantes es similar a la del cemento convencional y su tamaño va desde 0,2 hasta 200 micras, aunque pueden presentarse también máximo hasta 500 micras; la

³⁵ CEDEX. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011). (On-line) Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/>

^{34,35 & 36} CEDEX. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. (2011). (On-line) Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/>

AMBIENTAL Y SANITARIA

densidad de estas cenizas es aproximadamente de 0,89 gramos por cada centímetro cúbico y su peso específico va desde 2 hasta 2,9 gramos por cada centímetro cúbico. ³⁸ (CEDEX, 2011)

Ceniza es un término genérico para describir la materia en partículas que arrastran los gases que salen de los hornos que queman combustibles fósiles. Con frecuencia, los precipitadores electrostáticos se emplean para recolectar la ceniza. La fuerza más grande que sujeta la ceniza a la placa recolectora es la electrostática, y se debe al flujo de la corriente a través de la ceniza. ³⁹ (S.A., 1999)

5.2.8. Cemento

El cemento contiene materiales calcáreos como lo son la sílice, la alúmina y el óxido de hierro; en la presencia de humedad o añadiéndose agua directamente a este, da paso a la formación de una pasta conglomerante que tiene la capacidad de compactarse fuertemente. ⁴⁰ (RIVERA, 2013)

5.2.8.1.Cemento Portland

El cemento portland se forma a partir de triturar hasta convertir en polvo el Clinker y posterior a esto adicionarle formas de sulfato de calcio y otros productos adicionales que estén del tamaño del Clinker triturado, es decir, en forma de polvo o similar a este; el 90% o más del peso del cemento portland se compone aproximadamente de 60-70% de silicato tricálcico, 3-4% de

³⁹ AENE CONSULTORIAS S.A. (1999). MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración, parte aire y ruido.

AMBIENTAL Y SANITARIA

aluminato tricálcico y 1-2% de ferrito aluminato tetracálcico. Todos los cementos contienen estos compuestos y lo que los diferencia es la proporción que contienen. ⁴¹ (RIVERA, 2013)

5.2.9. Adoquín

5.2.9.1. Adoquín convencional

Un adoquín convencional es un bloque o piedra que es moldeado de forma rectangular el cual se utiliza en la construcción. Los materiales que generalmente son utilizados para su elaboración son el granito, debido a su gran resistencia, y también el basalto. ⁴² (CABO, 2011)

Las fábricas de ladrillos o adoquines convencionales deben encontrarse alejadas de la población ya que sus emisiones son propensas a causar enfermedades respiratorias o dermatológicas.

5.2.9.2. Adoquín ecológico

Parnisari (2014), señala que el ladrillo ecológico es incluido entre los materiales ecológicos, el cual actúa como un buen material aislante. Este llamado “adoquín ecológico” aporta gran beneficio en cuanto a la parte económica de una obra, ya que es duradero y capaz de resistir cargas más pesadas, lo cual quiere decir que cuenta con una mayor resistencia material. ⁴³ (PARNISARI, 2014)

³⁸ & ³⁹ Rivera, G. (2013). Concreto Simple.

⁴² Cabo, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Universidad Pública de Navarra, España.

⁴³ Parnisari, O. (2014). Ladrillos Ecológicos. Obtenido de la fuente: EcuRed.

Los adoquines ecológicos están contruidos a partir de un material que no degrada el medio ambiente y son respetuosos con este, a diferencia de los convencionales que para su fabricación requiere temperaturas demasiado elevadas usando combustibles que al quemarse liberan CO₂; estos adoquines ecológicos tienen cualidades parecidas a los convencionales en cuanto a calidad, esto quiere decir que son aptos para su implementación en la construcción. ⁴⁴ (CABO, 2011)

Algunos investigadores han descubierto que los ladrillos hechos con cenizas volantes pueden ser muy beneficiosos ya que en lugar de lixiviar cantidades minúsculas de mercurio como algunos investigadores habían predicho, los ladrillos aparentemente hacen lo contrario, sacando cantidades minúsculas del metal tóxico del medio ambiente. ⁴⁵ (CABO, 2011)

El adoquín ecológico además de tener un buen aspecto, presenta un buen rendimiento en cuanto a criterios ecológicos y sostenibles ya que para su elaboración consume un bajo nivel de energía y se elimina la emisión de CO₂ a la atmósfera ya que son adoquines que no requieren de cocción. ⁴⁶ (CABO, 2011)

^{42,43 & 44} Cabo, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Universidad Pública de Navarra, España.

Absorción de agua: La absorción de agua es la relación entre el agua absorbida en un tiempo determinado y la masa seca del árido. La prueba de absorción de agua consiste en someter bloques de concreto a la inmersión en agua hasta su saturación y luego al secado para registrar las variaciones en masa de estos.⁴⁷

Aditivo: Es una sustancia química, distinta del agua, los agregados, el cemento y los refuerzos de fibra, que se emplea como ingrediente de la pasta, del mortero o del concreto, y se agrega al conjunto antes o durante el proceso de mezclado, con el fin de modificar alguna o algunas de sus propiedades físicas, de tal forma que el material se adapte de una mejor forma a las características de la obra o las necesidades del constructor.⁴⁸

Adoquín: Un adoquín, son piezas de concreto simple que han pasado por un proceso de vibro compactación, generalmente tienen una forma rectangular y se utilizan en la construcción de pavimentos articulados.⁴⁹

Agregados: Los agregados, compuestos de materiales geológicos tales como, la piedra, la arena y la grava, se utilizan virtualmente en todas las formas de construcción. Se pueden aprovechar en su estado natural o bien triturarse y convertirse en fragmentos más pequeños.⁵⁰

⁴⁷ (RIVERA L, 2013)

⁴⁸ (RIVERA L, 2013)

⁴⁹ (SUPERMIX, s.f.)

⁵⁰ (CEMEX, s.f.)

Cemento: Es un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene: sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire.⁵¹

Clinker: La formación del Clinker procede de la calcinación de caliza y arcilla a una temperatura aproximada de 1400°C, su tamaño promedio es de 15 micrómetros.⁵²

Combustión: La combustión, en sentido amplio, puede entenderse como toda reacción química, relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea con o sin manifestación del tipo de llamas o de radiaciones visibles.⁵³

Hormigón: Material de construcción formado por una mezcla de Cemento, áridos (arena y grava), agua y aditivos en variadas proporciones.⁵⁴

Lignito: Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de aproximadamente 70%. Su poder calorífico varía entre 8.4 y 30 MJ/kg. Se diferencian uno más rico en carbono (lignito negro) y otro de menos rico (lignito pardo).⁵⁵

Lixiviación: La lixiviación, o extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido.⁵⁶

⁵¹ (RIVERA L, 2013)

⁵² (CEMEX, s.f.)

⁵³ (MAPFRE, s.f.)

⁵⁴ (POLANCO MADRAZO & SETIÉN MARQUÍNEZ)

⁵⁵ (León, s.f.)

⁵⁶ (DE LA IGLESIA CEBALLOS)

Materiales conglomerantes: Son materiales capaces de unir fragmentos de otras sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa (fraguado), produciendo nuevos compuestos.⁵⁷

Metales pesados: Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta. Son en general tóxicos para los seres humanos y entre los más susceptibles de presentarse en el agua destacamos mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo.⁵⁸

Patio de acopio: Parte exterior de la mina. Lugar empedrado con lajas o de cemento, donde se deposita el mineral para someterlo a la operación de clasificación, trituración, mezcla y otras.⁵⁹

Puzolana: Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX.⁶⁰

Resistencia material o modulo rotura: La resistencia de un elemento se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.⁶¹

⁵⁷ (BARLUENGA BADIOLA, 2008)

⁵⁸ (FACSA, 2017)

⁵⁹ (MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Glosario Técnico Minero, 2003)

⁶⁰ (LÓPEZ CASTILLO & HERNÁNDEZ MORA , 2018)

⁶¹ (COA VALERIANO, 2018)

Como consecuencia de los estudios realizados, fue seleccionado el sitio de la Planta "Termotasajero" en el departamento Norte de Santander, aproximadamente a 20 Km. al suroccidente de la ciudad de Cúcuta, sobre la margen derecha del río Zulia, en jurisdicción del municipio de San Cayetano y en un lote situado a una altura aproximada de 260 m. sobre el nivel del mar. Este sitio fue escogido por sus ventajas geológicas, la cercanía a los sitios de suministro de carbón, así como a las líneas de transmisión existentes y al río Zulia, cuyo caudal garantiza la cantidad de agua requerida por el sistema de enfriamiento de la Central durante todo el año.

Su sede administrativa se encuentra en la capital Bogotá D.C., en donde realiza sus transacciones comerciales y financieras con el sector eléctrico. ⁶² (TERMOTASAJERO, s.f.)

Termotasajero se encuentra ubicada en la Av0 10-78 de 204 Edif Colegio Médico

Cúcuta - Norte De Santander.

Su código plus es: R9X8+4W Tabiro, San Cayetano, Norte de Santander

(Los códigos plus funcionan exactamente igual que una dirección postal. Si la dirección no está disponible, puedes usar un código plus para buscar o compartir un sitio en Google Maps)

Es un municipio fundado en 1773 que cuenta con una temperatura promedio de 30 °C. Su distancia a Cúcuta es de 18 km. Su principal actividad económica en el cultivo de arroz, y se destacan algunas microempresas de tipo familiar dedicadas a la fabricación de utensilios de madera.

Es el quinto productor de carbón del departamento. Cerámica Andina S.A., Termotasajero S.A. son industrias que generan desarrollo y mano de obra a los habitantes de la región.

⁶² Termotasajero, Colgener. Disponible en:
http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=33

Presenta atractivos naturales y recreativos, entre los que se destacan: La Hamaca, la Quebrada de San Isidro, Pozo de la Viga de Cristo.⁶³ (CUCUTA, s.f.)

Figura 3. UBICACION GEOGRAFICA DE TERMOTASAJERO



Nota: La imagen representa la ubicación geográfica de Termotasajero S.A. Adaptado de <https://www.google.com/maps/place/Termotasajero/@7.8477973,-72.6324462,879m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e664c24622ee7ad:0xdccdfc61e566ab50!8m2!3d7.8478407!4d-72.6327057> . Todos los derechos de autor reservados 2021 por Google.

Adaptado con permiso del autor. (Maps, Ubicación geográfica , s.f.)

⁶³ Cucutanuestra.com. Cúcuta para el mundial. Disponible en: <https://www.cucutanuestra.com/temas/geografia/municipios/region-centro/san-cayetano/san-cayetano.htm>

Figura 4. VISTA SATELITAL DE LA UBICACION GEOGRAFICA DE TERMOTASAJERO



Nota: La imagen representa una vista ampliada de la planta generadora de electricidad. Ubicación geográfica con vista satelital de Termotasajero S.A. Adaptado de <https://www.google.com/maps/place/Termotasajero/@7.8477973,-72.6324462,879m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e664c24622ee7ad:0xdccdfc61e566ab50!8m2!3d7.8478407!4d-72.6327057> . Todos los derechos de autor reservados 2021 por Google. Adaptado con permiso del autor. (Maps, Ubicación geográfica - Vista Satelital, s.f.)



En la constitución política de Colombia y las normativas técnicas se tienen en cuenta los requisitos legales y otros aplicables a lo relacionado con los agregados, cenizas, aditivos conglomerantes y adoquines de concreto para la dosificación de la mezcla. A Continuación, se especifica la normativa:

Tabla 1. NORMATIVIDAD LEGAL

CLASIFICACIÓN		NORMA	DESCRIPCIÓN	APLICABILIDAD
General	Específica			
X		Resolución 5926 de 2011	Proyectos constructivos Ecoeficientes, amigables con el entorno, que propendan por la implementación de nuevas tecnologías que favorezcan la sostenibilidad ambiental.	Los adoquines ecológicos son una tecnología amigable con el medio ambiente ya que reutilizan un residuo que contamina.
X		Acuerdo Distrital 418 de 2009	Adoptar la Guía de Manejo Ambiental para el Sector de la Construcción.	Se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes y se dictan otras disposiciones.

X	NTC 174	Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto	<p>En esta norma se establecen los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos para su uso en las mezclas de concreto.</p>
X	NTC 77	Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos	<p>Establece la guía para elaboración de tamizado de los agregados finos y gruesos.</p>
X	NTC 2017	Adoquines de concreto para pavimento.	<p>Se establecen los parámetros de resistencia, absorción de agua, forma del adoquín, entre otras disposiciones.</p>
X	NTC 3823	Muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en el concreto.	<p>Se establecen los ensayos que deben realizarse a las cenizas volantes para determinar su composición.</p>

X	NTC 3493	<p>Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland.</p>	<p>disposiciones para las cenizas o puzolanas cuando se espera de estas una acción cementante en las mezclas de concreto.</p>
X	NTC 1377	<p>Método estándar especificado en la norma INVIAS, INV E – 402 – 13. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión, resistencia a la compresión de prefabricados de concreto.</p>	<p>Disposiciones para el curado de los adoquines que serán sometidos a prueba de resistencia.</p>

Fuente: Autoras. Basado en la Normativa Técnica Colombiana (NTC) y la normativa nacional para la administración y planificación ambiental de Colombia.

TERMOTASAJERO HOY

Misión

Generar y comercializar energía eléctrica con altos estándares de calidad para satisfacer las necesidades de nuestros clientes. Desarrollando nuestras actividades con criterios de rentabilidad y eficiencia, para garantizar la sostenibilidad empresarial y la generación del valor económico, con profundo respeto y responsabilidad ambiental para con las personas.

Visión

Termotasajero será reconocida como la empresa de generación térmica más competitiva del país, consolidando sus iniciativas de modernización e incorporación de las mejores prácticas en sus procesos operativos, comerciales y financieros, basados en el desarrollo de competencias de su recurso humano. Su participación creciente en los mercados, garantizará la sostenibilidad empresarial, la creación de valor y el bienestar social de las personas comprometidas con su actividad.

PRINCIPIOS CORPORATIVOS.

Creación de valor

Todos los miembros de la organización desarrollarán sus actividades para lograr la creación sostenida de valor económico del negocio, que permita invertir en su desarrollo, retribuyendo adecuada y oportunamente a sus accionistas, empleados y a su área de influencia.

Responsabilidad social

AMBIENTAL Y SANITARIA

Termotasajero seguirá cumpliendo con su responsabilidad de contribuir al desarrollo y al mejoramiento de la calidad de vida de las personas de su área de influencia.

Compromiso con la calidad

La calidad será una prioridad institucional y personal. Se constituirá en un mecanismo de mejoramiento continuo, como factor fundamental para el éxito empresarial.

Desarrollo del recurso humano

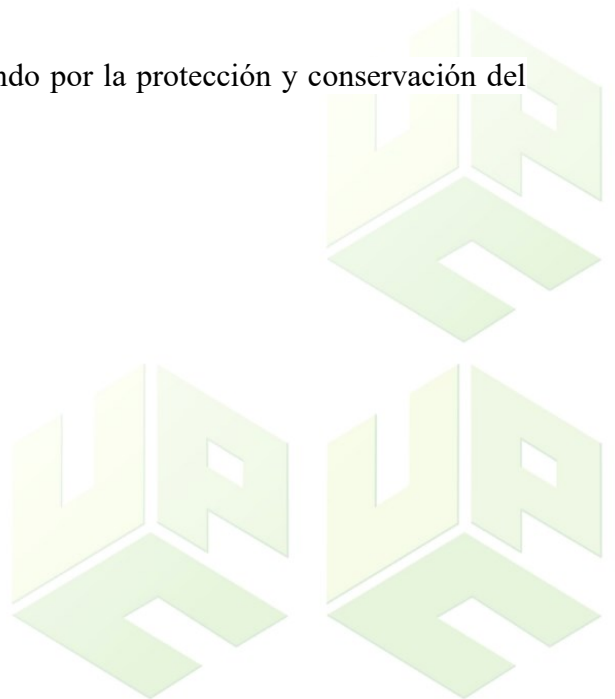
Termotasajero trabajara por el mejoramiento integral de sus funcionarios para desarrollar sus potencialidades laborales y sociales.

Ética empresarial

Las relaciones internas y externas de Termotasajero estarán enmarcadas en los principios de honestidad y transparencia.

Responsabilidad ambiental

Termotasajero desarrollará sus operaciones velando por la protección y conservación del medio ambiente en el marco del desarrollo sostenible



6. MARCO METODOLÓGICO

Este proyecto busca reutilizar las cenizas que son producto del proceso de combustión del carbón, generando así un doble beneficio ya que además de reciclarlas estas serán implementadas en la producción de adoquines ecológicos, los cuales, son un material indispensable para la construcción. Para esto se presenta a continuación la metodología que se llevó a cabo para alcanzar los objetivos planteados.

6.1. LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación de este proyecto es la de Sostenibilidad y Gestión Ambiental; y a su vez esta línea de investigación cuenta con unas sub-líneas, entre estas abarca la sub-línea de Producción más limpia y tecnologías ambientales.

6.2. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto es de carácter cuantitativo ya que se llevan a cabo procesos de causa y efecto de un residuo sólido y material particulado producto de actividades antropogénicas. Para relacionar dichas causas y efectos se usan magnitudes numéricas que se tratan mediante herramientas integradas en el campo de la estadística.

Este tipo de investigación es experimental, ya que se analizarán algunas características físicas que contienen los adoquines, dependiendo cada una de las distintas dosificaciones de cenizas volantes con las que será elaborado el adoquín. Teniendo en cuenta que se hará también el análisis comparativo con respecto al adoquín que carece de ceniza en su contenido.

El proceso se lleva a cabo teniendo en cuenta un promedio estadístico de la magnitud de ceniza generada anualmente por las termoeléctricas en Colombia para así demostrar qué es un proyecto muy beneficioso para el ambiente, el cual crea un producto ambientalmente sostenible teniendo en cuenta que su desarrollo no amenaza ninguna fuente de recurso natural ya que está estructurado principalmente de material de desecho.

AMBIENTAL Y SANITARIA

De acuerdo a su naturaleza, el nivel de investigación del presente proyecto no puede catalogarse en uno solo, por lo tanto, se puede decir que es experimental y explicativo; esto debido a que se manipula una variable y se produce un efecto en concreto que es producto de esta alteración a la variable implicada. Se realizará la comparación de dos rasgos, la dosificación de cenizas y las características con las que cuenta el adoquín al finalizarse el proceso de confección y curado; al mismo tiempo, valorar las variables dependientes que son: el módulo de rotura y la absorción de agua, y de la independiente que es la dosis de cenizas volantes. Finalmente, explicar por qué estas afectan la estructura de nuestro adoquín ecológico, lo anteriormente mencionado cumple con las características de una investigación de los mencionados niveles.

6.3. POBLACIÓN

La población que concierne a este proyecto está conformada por las cenizas producto de la combustión del carbón en el proceso de generación de energía que produce la termoeléctrica Termotasajero, asentada en el territorio colombiano. Estas han sido seleccionadas por su comportamiento naturalmente puzolánico y altas propiedades aglomerantes lo cual las hace con condiciones óptimas para su uso y aplicación en este campo.

6.4. MUESTRA

La muestra a utilizar de cenizas de carbón en el presente proyecto se va a adquirir de Termotasajero S.A E.S.P. Es una muestra probabilística ya que en la termoeléctrica se utiliza el mismo tipo de carbón para su combustión y generación de energía y la ceniza producto de este proceso tendrá las mismas características, en las mismas condiciones. Según el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, el carbón antracítico o bituminoso es el usado en el país por las industrias generadoras de energía eléctrica, ya que es el tipo de carbón adecuado para esta finalidad. En cuanto a este tipo de carbón, un 10% de su volumen se ve reflejado en ceniza cuando ya se somete a combustión. (UPME, 2016)

Por lo tanto, se considera que una muestra de ceniza volante tomada de otra empresa tendría los mismos resultados si se elabora de la misma manera. Se precisan 4 kilogramos de cenizas, siendo dicha muestra la requerida para la elaboración de los adoquines que se necesiten para estudiar sus propiedades y beneficios al medio ambiente, obtener resultados satisfactorios, hacer la debida comparación al adoquín convencional, cubrir cualquier margen de error e imprevistos que se puedan presentar; es un tipo de muestreo sistemático ya que si los resultados no son lo que se espera, se aumenta o disminuye el material presente en la muestra y se repite el proceso y los análisis de las proporciones de ceniza utilizadas.

Las cenizas deberán mantenerse en condiciones estables de humedad, por lo tanto, no deben estar expuestas a la humedad del ambiente frecuentemente, solo lo necesario para tomar la dosis para la confección del adoquín, la humedad a la que se verá expuesta al momento de tomar la muestra puede despreciarse ya que representaría un margen pequeño de error en la elaboración de la mezcla.

La ceniza volante proporciona sílice, aluminio y hierro, para que reaccione con la cal libre del cemento y forme compuestos cementantes. La norma NTC 3493 establece que el porcentaje máximo de inquemados para cenizas volantes tipo F es de 6 %; según estudios realizados por Chávez y Guerra en 2015, la pérdida por ignición de la muestra de ceniza volantes es de 7,96%. La norma NTC 3493 permite hasta un máximo de 12 % para cenizas volantes de tipo F. (CHAVEZ VELASQUEZ & GUERRA MAESTRE, 2015)

6.5.DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño del actual proyecto es de tipo experimental ya que se analizan variables en la composición del adoquín ecológico, como lo son la proporción o porcentaje de material que va a integrar el adoquín para determinar las causas que genera cierto grado de composición material, se contienen una variable independiente que es la porción utilizada para el experimento y variable dependiente como lo son los factores de absorción de agua y módulo de rotura; la clase de investigación y los procesos que conforman el proyecto hacen que este sea de naturaleza

AMBIENTAL Y SANITARIA

experimental pura, ya que hay una manipulación intencional de las variables dependientes y se mide la proporción de las variables independientes; las debidas experimentaciones será realizadas principalmente a escala de laboratorio.

Se realizarán adoquines de concreto simple, destinados a ser evaluados en cuanto a su efectividad para vías peatonales, los cuales contarán con distintas dosificaciones de cemento y ceniza volante. Se elaborarán cinco tratamientos de 8 repeticiones, uno de los cuales estará destinado a ser nuestra muestra patrón, es decir, nuestros adoquines guía, a los cuales no se les agrega ceniza volante y se les van a efectuar los mismos análisis y serán sometidos a las mismas pruebas que los adoquines con las distintas dosificaciones de ceniza volante.

La implementación, hasta cierta medida, de las cenizas de carbón en el diseño de mezcla para adoquines refleja una mejora en las propiedades de los mismos. Estas contienen en gran proporción Sílice, Cal, alúmina, entre algunos otros componentes, los cuales causan que este residuo se convierta en un potencial aditivo para materiales conglomerantes ya que tiene cierto comportamiento cementicio. Las cenizas tienen propiedades ligantes en presencia de materiales que activen su puzolanicidad. Por lo tanto, se proyecta que los adoquines realizados con cierto porcentaje de ceniza brinden beneficios positivos tanto en la parte económica, como en la parte de las propiedades que los caracterizan; en los análisis de módulo de rotura y absorción de agua se presentan resultados que aparte de cumplir con la normatividad vigente, se derivan en un ciclo de vida más amplio que se presenta como una mejor opción al momento de realizar una pavimentación articulada, debido a que sus propiedades derivan en un material con mayor durabilidad que el convencional ya que el uso de esta ceniza en la mezcla de concreto a largo plazo, mejora la resistencia.

Se elaboraron mezclas de concreto en el condominio SANTANA, a 5 min de Valledupar, donde actualmente se fabrican adoquines en un espacio abierto. Para esta actividad se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Mezcla para la elaboración de 8 adoquines con el 100% de cemento.
- Mezcla para la elaboración de 8 adoquines con el 95% de cemento + 5% de ceniza volante.
- Mezcla para la elaboración de 8 adoquines con el 90% de cemento + 10% de ceniza volante.
- Mezcla para la elaboración de 8 adoquines con el 85% de cemento + 15% de ceniza volante.
- Mezcla para la elaboración de 8 adoquines con el 80% de cemento + 20% de ceniza volante.

Tabla 2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Lotes por proporción de ceniza	Módulo de Rotura			Absorción de agua	Σ	
	Días	7	14			28
5%		2	2	2	2	8
10%		2	2	2	2	8
15%		2	2	2	2	8
20%		2	2	2	2	8
Muestra Patrón		2	2	2	2	8
Σ		10	10	10	10	40

Nota: Adoquines a realizar por cada diseño de mezcla con sus respectivas proporciones de cemento reemplazado por ceniza.

Según (RIVERA, 2013), cuando los datos son muy pocos (menos de 15), en nuestro caso son 6, el valor de Resistencia promedio a la flexión del concreto requerida para dosificar las mezclas en Mpa o kg/cm² (F'rr) debe ser tomado como:

$$F'rr = 1,20 * F'r$$

La NTC 2017 establece un valor de Modulo Rotura a los 28 días mínimo de 3,8 por adoquín y de 4,2 para un promedio de 5 especímenes.

Ya que se busca cumplir con la normatividad vigente, el valor que adoptaremos para el diseño de los adoquines será de 4,5 por espécimen. Por lo tanto, acogiéndonos a la formula planteada por Rivera (RIVERA, 2013):

$$F'rr = 1,20 * (4,5) = 5,4 \text{ Mpa (55,06 kg/cm}^2\text{)}$$

6.6.1. Dimensiones estándar del adoquín a utilizar

200mm * 100mm * 60mm

Figura 5. DIMENSIONES DEL ADOQUIN



Nota: La imagen es la representación, sin bisel, del adoquín realizado.

6.7.DESARROLLO METODOLÓGICO

Tabla 3. Etapa 1 - Desarrollo Metodológico

ETAPA N°1: Determinar las características de los materiales a utilizar para que el resultado sea el esperado.	
ACTIVIDAD 1.1. Investigar qué clase de carbón utiliza la termoeléctrica.	ACTIVIDAD 1.2. Investigar de fuentes fidedignas.
DESCRIPCIÓN: Se realizarán investigaciones breves en la página web oficial de la central térmica Termotasajero, de Colombia, y se sacarán conclusiones con respecto a la investigación realizada.	DESCRIPCIÓN: Se realizarán investigaciones y se presentara información de fuentes que hayan estudiado las propiedades físicas y químicas de las cenizas generadas por las termoeléctricas y se analizara toda la información recolectada, para así saber las cualidades que poseen las cenizas producto de determinado tipo de carbón usado en la termoeléctrica.

Tabla 4. Etapa 2 - Desarrollo Metodológico

ETAPA N°2: Elaborar un adoquín ecológico con las dosificaciones apropiadas de cenizas.	
ACTIVIDAD 2.1. Ajuste del diseño de mezcla.	ACTIVIDAD 2.2. Realizar el adoquín ecológico.
DESCRIPCIÓN: Se realizará una investigación del porcentaje de aditivos	DESCRIPCIÓN: Con las proporciones necesarias de ceniza ya

AMBIENTAL Y SANITARIA

<p>usualmente utilizados en los adoquines, para así, determinar qué diseño de mezcla será el más apropiado para la elaboración de nuestro adoquín ecológico, que se llama así debido a que es un material amigable con el medio ambiente por el hecho de que reutiliza un residuo.</p>	<p>establecidas se procede a la construcción del adoquín ecológico que tendrá las condiciones óptimas con respecto a lo establecido.</p>
--	--

Tabla 5. Etapa 3 - Desarrollo Metodológico

<p>ETAPA N°3: Evaluar la eficiencia de los adoquines como alternativa de uso sustentable en la construcción.</p>	
<p>ACTIVIDAD 3.1. Someter los adoquines a las pruebas planteadas con anterioridad.</p>	<p>ACTIVIDAD 3.2. Comparar los resultados de nuestro adoquín ecológico que posea las mejores propiedades con los resultados de nuestra muestra patrón.</p>
<p>DESCRIPCIÓN: Se realizarán a escala de laboratorio las pruebas de módulo de rotura y absorción de agua tanto del adoquín que no contiene ceniza como a los adoquines con las distintas proporciones de ceniza agregadas.</p>	<p>DESCRIPCIÓN: Realizamos las mismas pruebas en nuestros adoquines con distintas proporciones de ceniza y nuestro adoquín que no tiene ceniza para luego comparar los resultados del adoquín con la proporción de ceniza adecuada y nuestra muestra patrón.</p>

Tabla 6. Etapa 4 - Desarrollo Metodológico

<p>ETAPA N°4: Analizar la diferencia entre beneficios y costos de un adoquín convencional y un adoquín ecológico.</p>
--

AMBIENTAL Y SANITARIA

<p>ACTIVIDAD 4.1. Conocer el precio estándar de los adoquines utilizados usualmente en la construcción.</p>	<p>ACTIVIDAD 4.2. Hacer un balance de costo del adoquín ecológico.</p>
<p>DESCRIPCIÓN: Se investigará de diferentes fuentes comerciales cuál es el precio del adoquín convencional.</p>	<p>DESCRIPCIÓN: Se realizará un análisis del costo material que conlleva la realización del adoquín ecológico y se establece un precio razonable para así proceder a la comparación de precios y saber cuán favorecedor es utilizar un adoquín ecológico en contraste con los convencionales.</p>

6.8.PROCEDIMIENTO DE LA ELABORACIÓN DE MEZCLA PARA LOS ADOQUINES

Según (RIVERA, 2013), los pasos para realizar el diseño de mezcla son:

Tabla 7. Pasos para diseño de mezcla

Paso No.	Descripción
1	Seleccionar el asentamiento
2	Definir tamaño máximo de los agregados y módulo de finura
3	Estimación del contenido de agua en la mezcla
4	Determinación de la resistencia de diseño
5	Selección de la relación agua/cemento



-
- 6 Cálculo del contenido de cementos y aditivos
 - 7 Cálculo de volumen de agregados
 - 8 Cálculo de proporciones iniciales
 - 9 Realización de la mezcla

Nota: Serie de pasos planteados por las autoras, basados en el texto de Rivera. (RIVERA L, 2013)



7. RESULTADOS Y ANALISIS

Debido a que el proyecto es de naturaleza experimental, anteriormente se establecieron una serie de etapas, para lo cual, se establece lo siguiente para la consecución de resultados y realización de las mismas: la caracterización de materiales, el diseño de la mezcla, resultado de las pruebas y ensayos que se le realizan a cada espécimen con su respectivo análisis y, finalmente, la observación de los beneficios y costos que se obtienen al implementar un adoquín ecológico, con respecto al costo del adoquín convencional.

7.2. Caracterización de los materiales

7.2.1. Granulometría del agregado fino

Para la granulometría se tomó como referencia el proceso que plantea la NTC 77 (NTC 77. Normativa Técnica Colombiana, 2018), que estipula el método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, lo cual nos permitirá identificar la distribución del material.

En la tabla 8 se registran los resultados de la granulometría del agregado fino y en el gráfico 1 se evidencian los lineamientos que establece la NTC 174 (NTC 174. Normativa Técnica Colombiana, 2000) para límites superior e inferior de gradación de agregados.

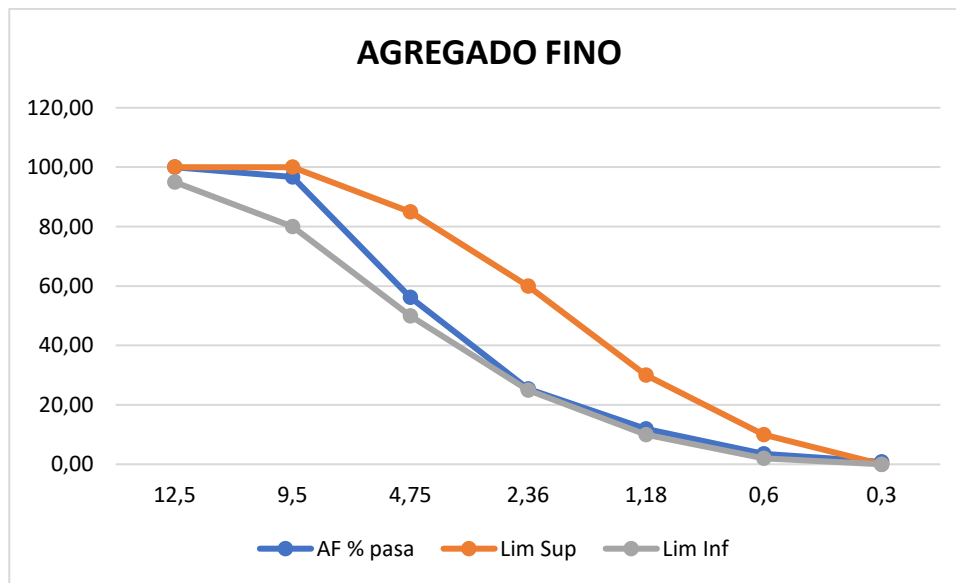
Tabla 8. Granulometría de agregado fino

ARENA FINA							
Masa Inicial: 1849,462366						Art 630.	Tabla 630-2
TAMIZ	DIAM. Mm	Peso ret. (g)	%RETENIDO	% Ret. Acum	% Pasa	Lim Sup	Lim Inf
4"	4,76	0	0	0	100	100	95
8"	2,36	60	3,24	3,24	96,76	100	80
16"	1,18	750	40,55	43,80	56,20	85	50
30"	0,6	570	30,82	74,62	25,38	60	25
50"	0,3	250	13,52	88,13	11,87	30	10
100"	0,15	155	8,38	96,51	3,49	10	2
							60

AMBIENTAL Y SANITARIA

140"	0,106	50	2,70	99,22	0,78	0	0
Fondo		14,5	0,78	100,00	0,00		
Sumatoria		1849,5	100,00		100,00		
Módulo de Finura (MF)		3,06					

Gráfico 1. Abertura del tamiz (mm) vs el % que pasa de la granulometría del agregado fino y los límites establecidos por la NTC 174.



Nota: El gráfico representa las curvas de los límites superior e inferior que establece la norma para agregados finos y la curva de granulometría del agregado fino.

Como se evidencia en el gráfico, el agregado fino cumple con lo requerido en la NTC 174, por lo tanto, puede emplearse en la elaboración del adoquín.

7.2.2. Granulometría del agregado grueso

Para la granulometría del agregado grueso se tomó como referencia el proceso que plantea la NTC 77 (NTC 77. Normativa Técnica Colombiana, 2018), que estipula el método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, lo cual nos permitirá identificar la distribución del material.

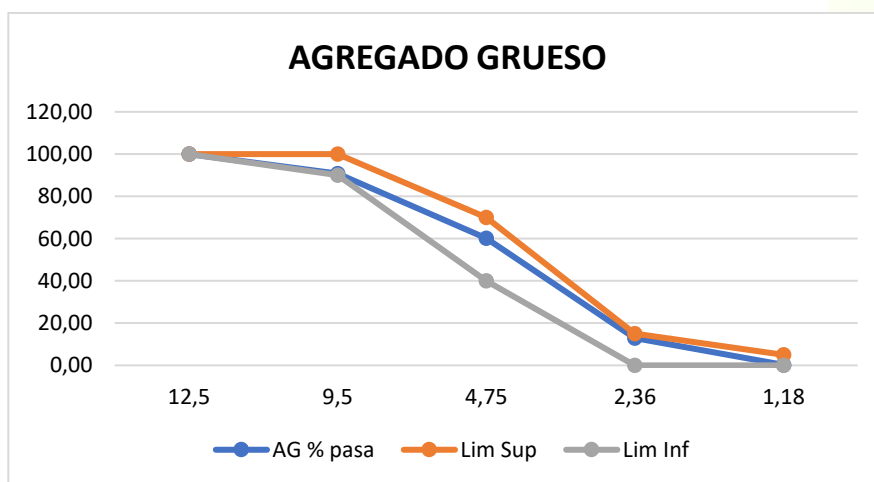
AMBIENTAL Y SANITARIA

En la tabla 9 se registran los resultados de la granulometría del agregado fino y en el gráfico 2 se evidencian los lineamientos que establece la NTC 174 para límites superior e inferior de gradación de agregados.

Tabla 9. Granulometría de agregado grueso

ARENA GRUESA							
Masa Inicial: 1894,736842						Tabla 2 (NTC 174)	
TAMIZ	DIAM. Mm	Peso ret.	%RETENIDO	% Ret. Acum	% Pasa	Lim Sup	Lim Inf
3/4"	19	0	0	0	100	100	100
1/2"	12,5	175	9,24	9,24	90,76	100	90
3/8"	9,52	580	30,61	39,85	60,15	70	40
4"	4,75	895	47,24	87,08	12,92	15	0
8"	2,36	240	12,67	99,75	0,25	5	0
Fondo		4,7	0,25	100,00	0,00		
Sumatoria		1894,7	100,00				
Tamaño Máximo (TM) 3/4"							
Tamaño Máximo Nominal (TMN) 1/2"							

Gráfico 2. Abertura del tamiz (mm) vs el % que pasa de la granulometría del agregado grueso y los límites establecidos por la NTC 174.



AMBIENTAL Y SANITARIA

Nota: El gráfico representa las curvas de los límites superior e inferior que establece la norma para agregados gruesos y la curva de granulometría del agregado grueso utilizado en el proyecto.

Como se puede observar, el agregado grueso cumple con los parámetros requeridos por la NTC 174 (NTC 174. Normativa Técnica Colombiana, 2000), por lo tanto, puede emplearse en la elaboración del adoquín.

7.2.3. Proporción de los agregados para el diseño de mezcla (Método de Fuller)

A partir de la granulometría de los agregados se escoge la curva ideal de Fuller según el tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN = 12,5 mm) y aplicando la siguiente ecuación: (Rodríguez, 2018).

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D_{FULLER}}}$$

Donde:

Y = % pasa de agregado por cada tamiz

d = Tamaño de la abertura de los distintos tamices

D_{FULLER} = Tamaño máximo nominal

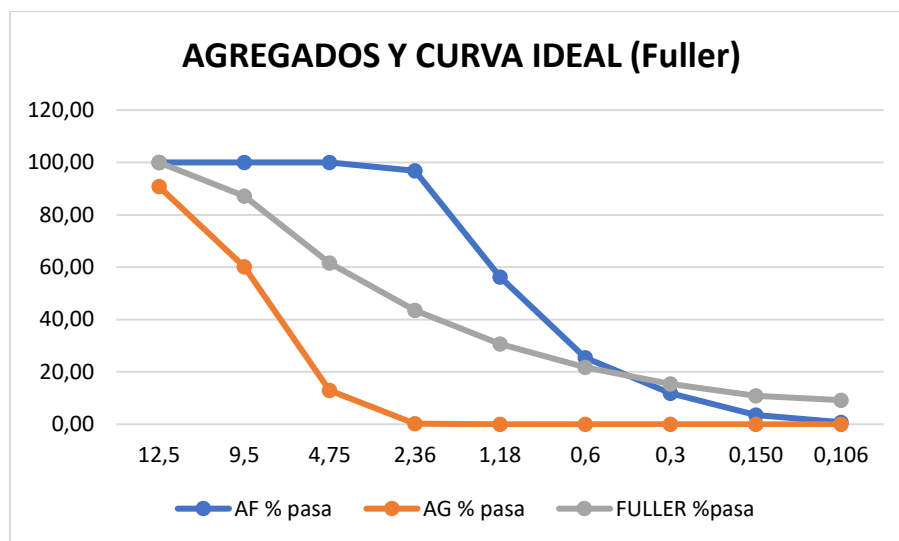
Tabla 10. %pasa de agregados y %pasa Fuller

TAMIZ	AF % pasa	AG % pasa	FULLER %pasa
12,5	100,00	90,76	100,00
9,5	100,00	60,15	87,18
4,75	100,00	12,92	61,64
2,36	96,76	0,25	43,45

AMBIENTAL Y SANITARIA

1,18	56,20	0,00	30,72
0,6	25,38	0,00	21,73
0,3	11,87	0,00	15,41
0,15	3,49	0,00	10,92
0,106	0,78	0,00	9,21
SUMA	494,48	164,09	380,26

Gráfico 3. Agregados y curva ideal (Fuller)



Nota: El gráfico representa las curvas de los límites superior e inferior que establece la norma para agregados finos y la curva de granulometría del agregado fino utilizado en el proyecto.

Calculamos el Módulo Granulométrico (MG) para el agregado grueso (MG ag), el agregado fino (MG af) y el módulo granulométrico de Fuller (MG1) mediante la ecuación:

$$MG = \frac{1000 - \Sigma \%pasa}{100}$$

Tabla 11. Módulos Granulométricos

Módulo Granulométrico	
MG af (MGf)	5,06
MG ag (MGg)	8,36
MG Fuller (MG1)	6,20

Planteamos las dos ecuaciones de los agregados grueso y fino que intervienen en la mezcla y resolvemos el sistema de ecuaciones que resulta.

$$f + g = 100$$

$$MG_{af} * f + MG_{ag} * g = MG_1 (f + g)$$

$$f = 100 - g$$

$$5,06 * f + 8,36 * g = 6,2 (f + g)$$

$$5,06 * (100 - g) + 8,36 * g = 6,2 ((100 - g) + g)$$

$$506 - 5,06 g + 8,36 g = 620 - 6,2 g + 6,2 g$$

$$3,3 g = 620 - 506$$

$$g = \frac{114}{3,3}$$

$$g = 34,54 \% \quad - \quad \text{Agregado Grueso}$$

$$f = 100 - g$$

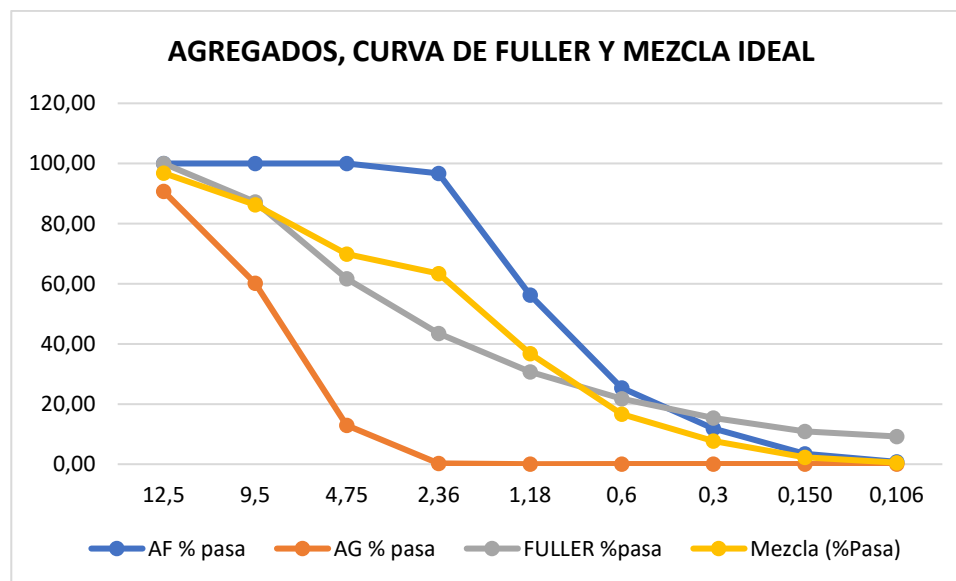
$$f = 100 - 34,54$$

$$f = 65,46 \% - \text{Agregado Fino}$$

Tabla 12. %pasa de agregados, Fuller y Mezcla

TAMIZ	AF % pasa	AG % pasa	FULLER %pasa	Mezcla (%Pasa)
12,5	100,00	90,76	100,00	96,81
9,5	100,00	60,15	87,18	86,24
4,75	100,00	12,92	61,64	69,92
2,36	96,76	0,25	43,45	63,42
1,18	56,20	0,00	30,72	36,79
0,6	25,38	0,00	21,73	16,62
0,3	11,87	0,00	15,41	7,77
0,15	3,49	0,00	10,92	2,28
0,106	0,78	0,00	9,21	0,51
SUMA	494,48	164,09	380,26	380,36

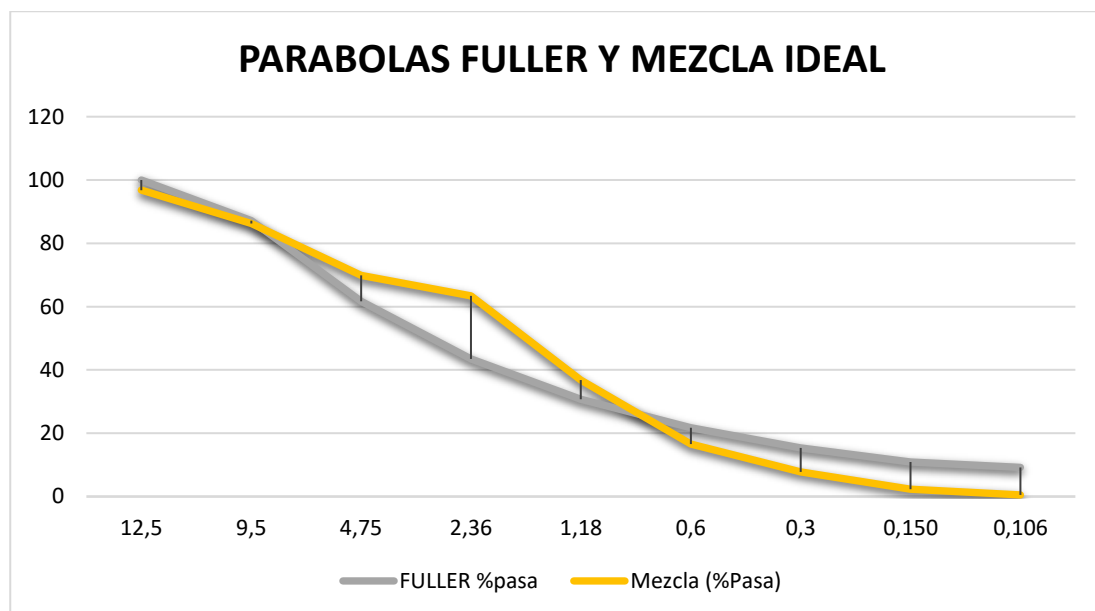
Gráfico 4. Parábolas de agregados, Fuller y Mezcla



AMBIENTAL Y SANITARIA

El gráfico nos representa la parábola de la mezcla y podemos ver que su modulo granulométrico es similar a la parábola de Fuller, ya que el MG Fuller y el MG Mezcla es de 6,2, la proporción calculada para cada agregado es lo más aproximado que podemos realizar a la parábola ideal de Fuller.

Gráfico 5. Área entre parábolas de Fuller y Mezcla



Matemáticamente hablando es lo más exacto que puede realizarse, ya que si comparamos las áreas que se forman entre el área superior y el área inferior de las parábolas de Fuller y Mezcla, estas son las mismas.

7.2.4. Cenizas volantes

Las cenizas volantes procedentes de la termoeléctrica Termotasajero tienen las siguientes características:

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CENIZA
VOLANTE DE TERMOTASAJERO**

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
HUMEDAD	%	0,17
INQUEMADOS	%	7,96
DENSIDAD	g/cm ³	2,14

Nota: Realizada por las autoras. Basado en (CHAVEZ VELASQUEZ & GUERRA MAESTRE, 2015) y (ARRIETA TORDECILLA & PINZÓN BOGOTÁ, 2019)

La NTC 3493 (NTC 3493. Normativa Técnica Colombiana, 2019), establece un máximo de 6% en inquemados para que cenizas tipo F puedan ser utilizadas como aditivos a las mezclas de concreto, sin embargo, permite la utilización de cenizas tipo F que contengan hasta un 12% de inquemados si al realizar ensayos de laboratorios se registran un desempeño y resultados aceptables.

7.3. Diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla consiste en estimar las proporciones de cada componente de la mezcla (cemento, agua, aditivos, agregado fino y grueso) para que, al endurecerse, el concreto tenga las propiedades óptimas de resistencia, durabilidad y apariencia.

De los materiales se conoce:

- Agregado Grueso

Tabla 14. Datos del Agregado Grueso

DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AG	
Densidad (g/cm ³)	Aparente 2,79

MUs (Kg/m³)	1394
MUc (Kg/m³)	1552
Absorción (%)	1,8
Humedad (%)	5,2

- **Agregado Fino**

Tabla 15. Datos del Agregado Fino

DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AF	
Densidad Aparente (g/cm³)	2,64
MUs (Kg/m³)	1547
MUc (Kg/m³)	1719
Absorción (%)	2,38
Humedad (%)	7,5

- **Cemento**

Tabla 16. Datos del Cemento

Cemento ARGOS tipo I	
Densidad del cemento (g/cm³)	3,1

Para realizar el diseño de mezcla se llevaron a cabo los 9 pasos que establece Rivera (RIVERA, 2013) registrados en la tabla 7, a continuación, se detallan:

Paso N°1 - Seleccionar el asentamiento

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (mm).	EJEMPLO DE TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
MUY SECA	0,0 – 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantalla de cimentación.	Con vibradores de formaleta, concretos de proyección neumática (lanzados).	Secciones sujetas a vibración externa, puede requerirse presión.
SECA	20-35	Pavimentos.	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
SEMISECA	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple, losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
MEDIA (PLÁSTICA)	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
HÚMEDA	100-150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas con vibración.
MUY HÚMEDA	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos "in situ".	Tubo-embudo-tremie.	Secciones altamente reforzadas con vibración.

SÚPER FLUIDA	más de 200	Elementos esbeltos.	muy	Autonivelante, autocompactante.	Secciones altamente reforzadas vibración normalmente adecuados vibrarse.	sin y no para
-------------------------	------------	------------------------	-----	------------------------------------	--	------------------------

Nota: Basado en el texto de Rivera (RIVERA, 2013), Pag175.

El asentamiento escogido para la elaboración de los adoquines fue de 0mm debido a que es el óptimo para la realización de prefabricados cuyo sistema de compactación obedece a vibración extrema y secciones sometidas a presión; el cual es el sistema de compactación que, en este caso, caracteriza a la maquina utilizada para la confección de los adoquines.

Paso N°2 - Definir tamaño máximo de los agregados y módulo de finura

Según la granulometría de los agregados fino y grueso:

$$\text{Tamaño Maximo Nominal (TMN)} = 1/2" (12,5 \text{ mm})$$

$$\text{Módulo de Finura (MF)} = 3,06$$

Paso N°3 - Estimación del contenido de agua en la mezcla

Tabla 18. Asentamiento para concretos sin aire incluido

Asentamiento (cm)	CONCRETOS SIN AIRE INCLUIDO						
	TAMAÑOS MÁXIMOS NOMINALES (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0,0 - 2,5	185	180	165	160	140	135	125
3,0 - 5,0	205	200	185	180	160	155	145
5,5 - 7,5	215	210	190	185	175	165	155
8,0 - 10,0	225	215	200	195	175	170	165

AMBIENTAL Y SANITARIA

10,5 - 15,0	235	225	205	200	180	175	170
15,5 - 18,0	240	230	210	205	185	180	175
% CONTENIDO DE AIRE	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3

Nota: Tomado del texto de Rivera. (RIVERA, 2013), Pag176.

Acorde a la tabla 14 (estimación de agua de acuerdo al asentamiento para concretos sin aire incluido), la cantidad de agua requerida para obtener un asentamiento de 0 con un TMN de ½” es de 180 kg/m³.

Paso N°4 - Determinación de la resistencia de diseño

La resistencia a la compresión para los adoquines de concreto se estableció en 15Mpa, este valor fue tomado de la tesis experimental de Caicedo Quinayás (CAICEDO QUINAYÁS, 2016), que a su vez fue tomada de Caicedo y Pérez, 2014. (Caicedo Campo & Pérez Henao, 2014)

En el texto de Concreto Simple de Rivera se establece un criterio para establecer la resistencia final del concreto cuando no se conoce la desviación estándar, no hay datos o son muy pocos los números de resultados como para calcularla (menos de 15):

Tabla 19. Resistencia promedio requerida a la compresión cuando no hay datos que permiten determinar la desviación estándar

Resistencia nominal a la compresión F'c Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión F'cr Mpa
Menos de 21 Mpa	F'c + 7 Mpa
De 21 Mpa a 35 Mpa	F'c + 8,5 Mpa
Más de 35 Mpa	F'c + 10 Mpa

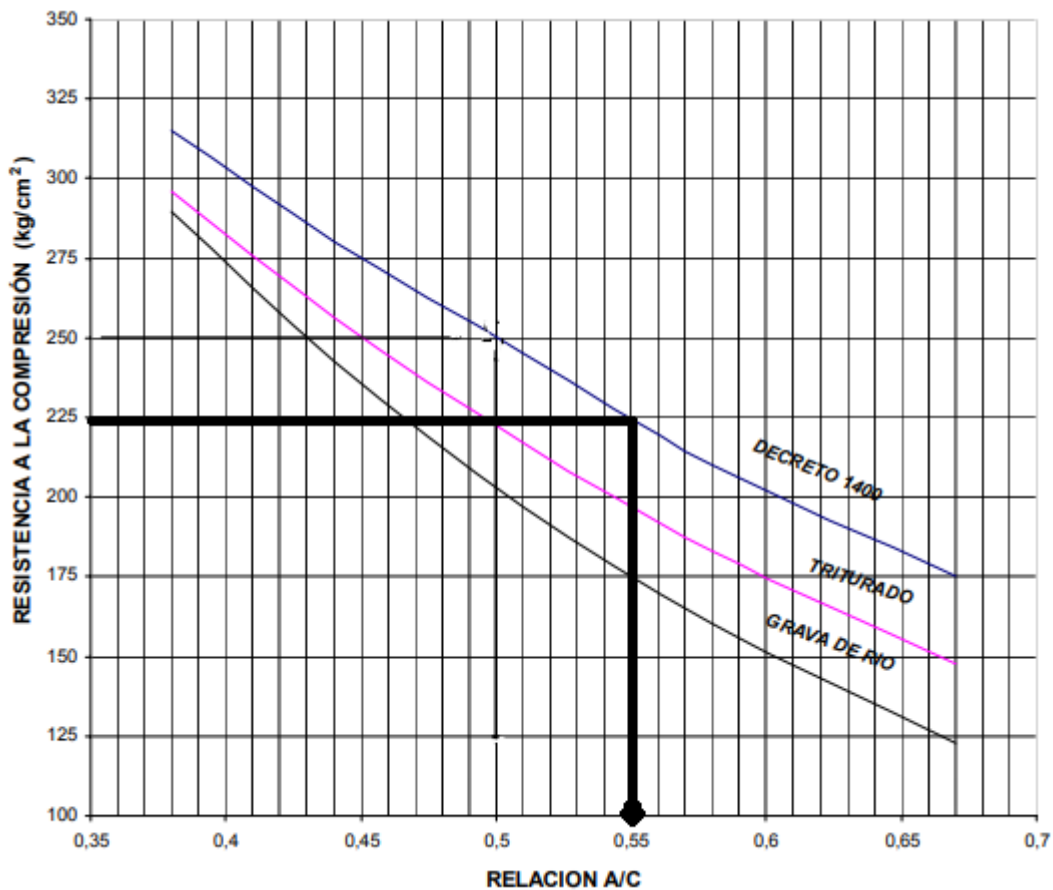
Nota: Resistencia del concreto. Basado en el texto de Rivera. (RIVERA, 2013), Pag 125.

Finalmente, según lo planteado en la tabla 19, para resistencias de mezcla proyectadas a menos de 21 Mpa, la resistencia promedio final requerida para la mezcla es de 22 Mpa.

Paso N°5 - Selección de la relación agua/cemento

Ya que los adoquines no estarán expuestos a condiciones severas no se tienen en cuenta las limitaciones y especificaciones establecidas para mezclas expuestas a ataques de sulfatos o ciclos de hielo-deshielo, entre otros:

Gráfico 6. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN vs A/C



La relación agua/cemento según el grafico 6, obtenido del texto de Rivera, es de 0,55 para una resistencia a la compresión promedio de 224 kg/cm².

Paso N°6 - Cálculo del contenido de cementos y aditivos

Ya que se tiene una relación A/C de 0,55 y una cantidad determinada de agua de 180 kg/m³, se calcula la cantidad de cemento:

$$0,55 = \frac{180 \text{ kg/m}^3}{C}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 327 \text{ kg/m}^3$$

- Volumen por adoquín

De acuerdo a las medidas del adoquín se calcula el volumen por cada uno de ellos y saber la cantidad de material para cada diseño de mezcla que se va a realizar.

$$\text{Longitud} * \text{Ancho} * \text{Espesor}$$

$$20\text{cm} * 10\text{cm} * 6\text{cm}$$

$$V = 1200 \text{ cm}^3 = 0,0012 \text{ m}^3$$

- Volumen total para cada mezcla

La cantidad de adoquines a elaborar por cada tipo de mezcla son 8.

$$V = 0,0012 \text{ m}^3 * 8 \text{ adoquines} = 0,0096 \text{ m}^3$$

Para tener en cuenta un factor de seguridad por desperdicio en la elaboración de cada mezcla, se multiplica por un factor de seguridad de 1,1.

$$V = 0,0096 \text{ m}^3 * 1,1 = 0,0106 \text{ m}^3$$

- **Cantidad de ceniza a reemplazar en cada dosificación**

Cemento

$$1 \text{ m}^3 \rightarrow 327 \text{ kg}$$

$$0,0106 \text{ m}^3 \leftarrow X$$

$$X = 3,5 \text{ kg}$$

$$5\% = (3,5 \text{ kg} * 0,05) = 0,175 \text{ kg de ceniza y } 3,325 \text{ kg de cemento}$$

$$10\% = (3,5 \text{ kg} * 0,10) = 0,35 \text{ kg de ceniza y } 3,15 \text{ kg de cemento}$$

$$15\% = (3,5 \text{ kg} * 0,15) = 0,525 \text{ kg de ceniza y } 2,975 \text{ kg de cemento}$$

$$20\% = (3,5 \text{ kg} * 0,20) = 0,7 \text{ kg de ceniza y } 2,8 \text{ kg de cemento}$$

Paso N°7 - Cálculo de volumen de agregados

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \text{Vol. agua} - \text{Vol. cemento}$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \frac{180}{1} - \frac{327}{3,1}$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 714,5 \text{ dm}^3$$

- **Densidad promedio de los agregados**

$$G \text{ Prom.} = \frac{100}{\sum \frac{\%i}{G_i}}$$

$$G \text{ Prom.} = \frac{100}{\frac{34,5}{2,79} + \frac{65,5}{2,64}}$$

$$G \text{ Prom.} = 2,69 \text{ kg/dm}^3$$

Masa de los agregados = 714,5 * 2,69 = 1922,005 kg/m³ de concreto

Masa del agregado fino = 1914,86 * 0,655 = 1258,91 kg/m³ de concreto

Masa del agregado grueso = 1914,86 * 0,345 = 663,09 kg/m³ de concreto

Paso N°8 - Cálculo de proporciones iniciales

Tabla 20. Proporciones de materiales

Material	Masa (kg / m ³ ccto)	Densidad (g/cm ³)	Vol. Abs. (dm ³ / m ³ de ccto)	Prop. en masa seca
Cemento	327	3,1	105,48	1
Agua	180	1	180	0,55
Aire	-	-	0	-



AMBIENTAL Y SANITARIA

AG. Grueso	663,09	2,79	237,66	2,02
AG. Fino	1258,91	2,64	476,86	3,84
Σ	2429	-	1000	-

Paso N°9 - Realización de la mezcla

- Volumen de concreto a preparar en la primera mezcla

$$0,0106 \text{ m}^3$$

- Cantidad de cemento para la primera mezcla de prueba

$$0,0106 \text{ m}^3 * 327 \text{ kg/m}^3 = 3,47 \text{ kg de cemento}$$

Agregado grueso (Wng) = 5,2 % Absg = 1,8 %

Agregado fino (Wnf) = 7,5 % Absf = 2,38 %

↙ *Tabla 21. Aporte de agua por los materiales*

Material (1)	Prop. Inc. (2)	Masa Seca (kg) (3)	Masa Hum. (kg) (4)	Agua Agr. (kg) (5)	Absorción (kg) (6)	Agua libre (kg) (7)	Aporte (kg) (8)
Cemento	1	3,47	-	-	-	-	-
Agua	0,55	1,91	-	-	-	-	-
AG. Grueso	2,02	7,01	7,37	0,36	0,13	0,23	-
AG. Fino	3,84	13,32	14,32	1	0,32	0,68	0,91

$$(3) = (2) * C1$$

$$(4) = \frac{(3) * (100 + Wn)}{100}$$

$$(5) = (4) - (3)$$

$$(6) = \frac{(3) * \%abs}{100}$$

$$(7) = (5) - (6)$$

$$(8) = \Sigma (7)$$

Agua de mezcla (teórica) = agua calculada - aporte

$$\text{Agua de mezcla (teórica)} = 1,91 - 0,91 = \mathbf{1 \text{ kg}}$$

$$\text{Cemento} = 3,47 \text{ kg}$$

$$\text{AG. Grueso} = 7,37 \text{ kg}$$

$$\text{AG. Fino} = 14,32 \text{ kg}$$

Nota: Al realizar la mezcla se adicionaron 0,3 dm³ de agua, ya que la mezcla estaba un poco seca, por lo tanto, se realiza ajuste al diseño de mezcla con respecto a la relación Agua/Cemento para cumplir con las características requeridas.

7.3.1. Corrección del diseño de mezcla por el cambio de la relación Agua/Cemento

El agua utilizada en realidad fue de 1,3 dm³, por lo tanto:

$$\text{Agua} = \text{agua de mezcla (real)} + \text{aporte}$$

$$\text{Agua} = 1,3 + 0,91 = 2,21 \text{ dm}^3$$

$$\frac{A}{C} \text{ utilizada} = \frac{2,21}{3,47} = 0,64$$

A/C utilizada \neq A/C escogida, entonces se realizaron ajustes a la mezcla anterior.

7.3.1.1. Ajuste por cambio de relación A/C

- Paso 1 – Calculo de cantidad de cemento

Tabla 22. Cálculo de cantidad de cemento

Material	Prop. Utilizada	Masa mat. (kg) (1)	Densidad (g/cm ³) (2)	Vol. Abs. (dm ³) (3)
Cemento	1	1 ζ	3,1	0,32 ζ
Agua	0,64	0,64 ζ	1	0,64 ζ
AG. Grueso	2,02	2,02 ζ	2,79	0,72 ζ
AG. Fino	3,84	3,84 ζ	2,64	1,45 ζ
Σ	-	-	-	3,13 ζ

Fuente: Realizada por las autoras. $\frac{(1)}{(2)} = (3)$

$$3,13 * \zeta \text{ dm}^3 \text{ ccto} = 1000 \text{ dm}^3 \text{ ccto}$$

$$C = \frac{1000}{3,13} = 319,48 \text{ kg de cemento}$$

- Paso 2 – Obtener cantidad de los agregados

Tabla 23. Cantidad de agregados

Material	Prop. Utilizada	Masa mat. (kg) (1)	Densidad (g/cm ³) (2)	Vol. Abs. (dm ³) (3)
Cemento	1	319,48	3,1	102,23
Agua	0,64	204,47	1	204,46
AG. Grueso	2,02	645,35	2,79	230,02
AG. Fino	3,84	1226,8	2,64	463,25
Σ	-	-	-	999,9

- Paso 3 – Ajuste (Para 1m³ de concreto) – Se sacaron las proporciones finales para el segundo diseño, conservando la relación A/C planteada en el diseño de mezcla inicial.

Tabla 24. Corrección de mezcla por agua agregada

Material	Prop. Utilizada (1)	Masa mat. (kg) (2)	Densidad (g/cm ³) (3)	Vol. Abs. (dm ³) (4)
Cemento	1	371,76	3,1	119,92
Agua	0,55	204,47	1	204,47
AG. Grueso	1,89	626,99	2,79	224,72
AG. Fino	3,59	1190,39	2,64	450,9
Σ	-	-	-	1000

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \text{Vol. agua} - \text{Vol. cemento}$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - 204,47 - 119,92$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 675,61 \text{ dm}^3$$

$$G \text{ Prom. Ag} = 2,69 \text{ kg/dm}^3$$

Masa de los agregados = $675,61 * 2,69 = 1817,39$ kg/m³ de concreto

Masa del agregado fino = $1817,39 * 0,655 = 1190,39$ kg/m³ de concreto

Masa del agregado grueso = $1817,39 * 0,345 = 626,99$ kg/m³ de concreto

En la [tabla 21](#) se evidencia que por parte de los agregados gruesos y finos se realiza un aporte de agua a la mezcla de 0,91 kg; al momento de realizar la mezcla se notó algo seca por lo que se le adicionaron 0,3 litros de agua, obteniéndose así un total de 1,3 litros agregados de agua y 2,21 litros de agua efectiva contenidos en la mezcla.

7.3.2. Realización de la mezcla con el ajuste por adición de agua

En la preparación de la mezcla de concreto, primero se pesaron y midieron cada uno de los materiales (cemento, agua, agregado fino y agregado grueso) y luego se integraron en un solo lugar para proceder a mezclarlos y así obtener la consistencia deseada y verterlos al molde ubicado en la máquina, para posteriormente ser sometidos a vibro compactación.

7.3.2.1. Mezcla con contenido de 100% de cemento (Mezcla 1)

$$\text{Vol. de mezcla} = 0,0106 \text{ m}^3$$

$$\text{Cemento para } 1 \text{ m}^3 = 371,76 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cemento a utilizar} = 0,0106 \text{ m}^3 * 371,76 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{3,94 \text{ kg}}$$

7.3.2.1.1. Cantidades totales en masa de cada material para las mezclas

Tabla 25. Cantidades de material para mezcla patrón

Material	Densidad (g/cm ³)	Prop. Peso Utilizada	Prop. Vol. Utilizada	Masa mat. (kg)	Vol Mat (dm ³)
Cemento	3,1	1	1	3,94	1,27
Agua	1	0,55	0,55	2,2	2,2
AG. Grueso	2,79	1,77	1,89	6,97	2,49
AG. Fino	2,64	3,08	3,59	12,14	4,59

Tabla 26. Cantidades de material para cada mezcla con las diferentes dosificaciones

Porcentaje de peso sustituido de cemento por ceniza volante en la muestra					
Mat. / %	Mezcla Patrón	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
	0%	5%	10%	15%	20%
Cemento (kg)	3,94	3,743	3,546	3,349	3,152
Ceniza (kg)	0	0,197	0,394	0,591	0,788
Agua (kg)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
AG. Grueso (kg)	6,97	6,97	6,97	6,97	6,97
AG. Fino (kg)	12,14	12,14	12,14	12,14	12,14

En la tabla 26 se presentan la cantidad, en masa, detallada de cada agregado usado en cada mezcla realizada, diferenciándose únicamente entre la cantidad de cemento y ceniza implementada en cada una, ya que lo que se busca reemplazar y disminuir es la cantidad de cemento requerida.

Se presentan los resultados detallados en cada uno de los tiempos en los que se realizaron las pruebas de resistencia a la flexión, al final del apartado, un resumen para comparar la evolución en cuanto a resistencia de los especímenes.

7.4.1. Resultados de adoquines sometidos a la prueba de Modulo Rotura

Para realizar los cálculos del módulo de ruptura, según la (ASTM C293, 2016) se debe implementar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura, en MPa.

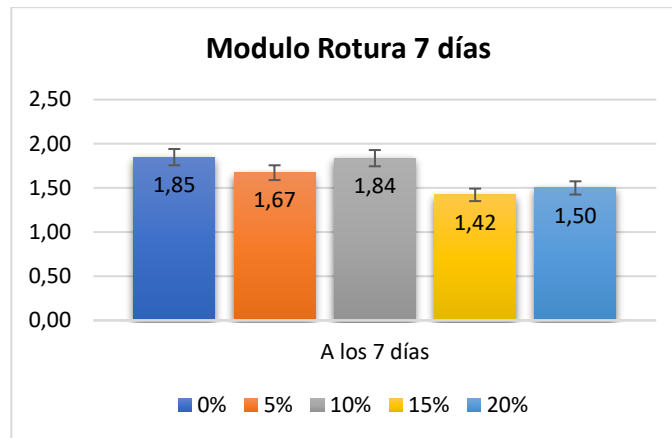
P = Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, en N.

L = Longitud entre soportes, en mm.

b = Ancho promedio del espécimen, en mm.

d = Espesor promedio del espécimen, en mm.

7.4.1.1.Resultado de adoquines fallados a los 7 días de curado



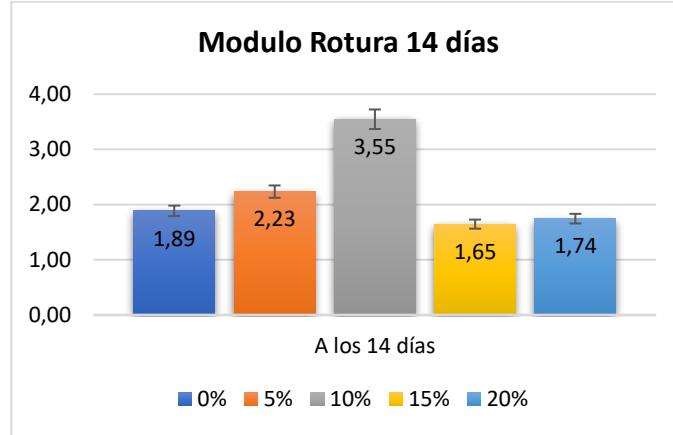
Nota: Tabla de valores en el [Anexo AI](#)

Los resultados en cuanto a resistencia a la flexión obtenidos a los 7 días de curado de los especímenes presentan valores similares. No existe diferencia considerable entre las mezclas en cuanto a resistencia a los 7 días.

7.4.1.2.Resultado de adoquines fallados a los 14 días de curado

Gráfico 8. Modulo Rotura a los 14 días de curado



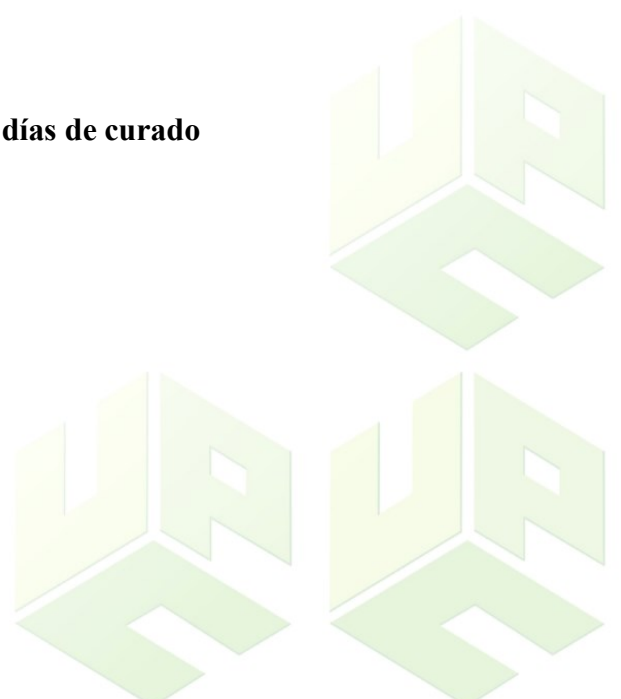


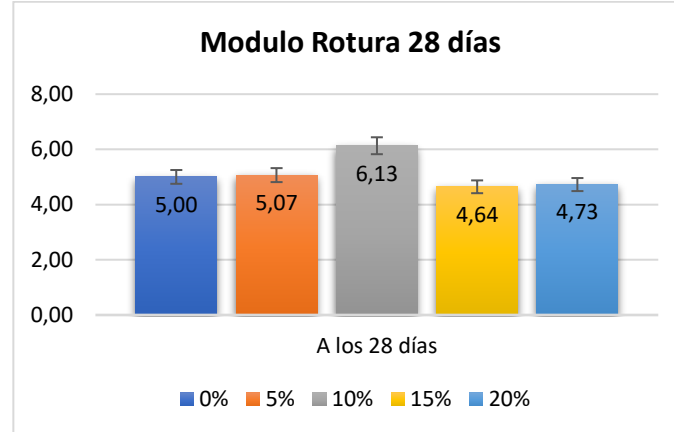
Nota: Tabla de valores en el [Anexo AI](#)

En el anterior gráfico se evidencia que, a los 14 días de curado los especímenes no tienen un cambio considerable con respecto a los adoquines fallados a los 7 días, exceptuando los realizados a partir de la mezcla 2 (10%), que a los 7 días arrojaron resultados de 1,84Mpa y a los 14 días un resultado de 3,55Mpa como resistencia a la flexión, presentando así un incremento de aproximadamente un 48% con respecto a su resistencia inicial.

7.4.1.3. Resultado de adoquines fallados a los 28 días de curado

Gráfico 9. Modulo Rotura a los 28 días de curado





Nota: Tabla de valores en el [Anexo AI](#)

En el grafico anterior se evidencia la resistencia final de los especímenes, de los cuales el resultado más favorable es el de los adoquines realizados a partir de la mezcla 2, con el 10% de ceniza en su composición, dando como resistencia final 6,13Mpa, presentando un incremento con respecto a su resistencia inicial (a los 7 días de curado) de aproximadamente 70%.

La NTC 2017 (NTC 2017. Normativa Técnica Colombiana, 2018), establece que la relación Longitud/ancho real de los adoquines no debe ser mayor de 2,5. De la misma forma, el valor de la relación Longitud/espesor real no debe ser mayor de 5. Atendiendo a estas consideraciones, todos los especímenes cumplen con estos requisitos. (Ver [tabla de Anexo A](#))

7.4.2. Resultados globales de adoquines sometidos a prueba de Modulo Rotura

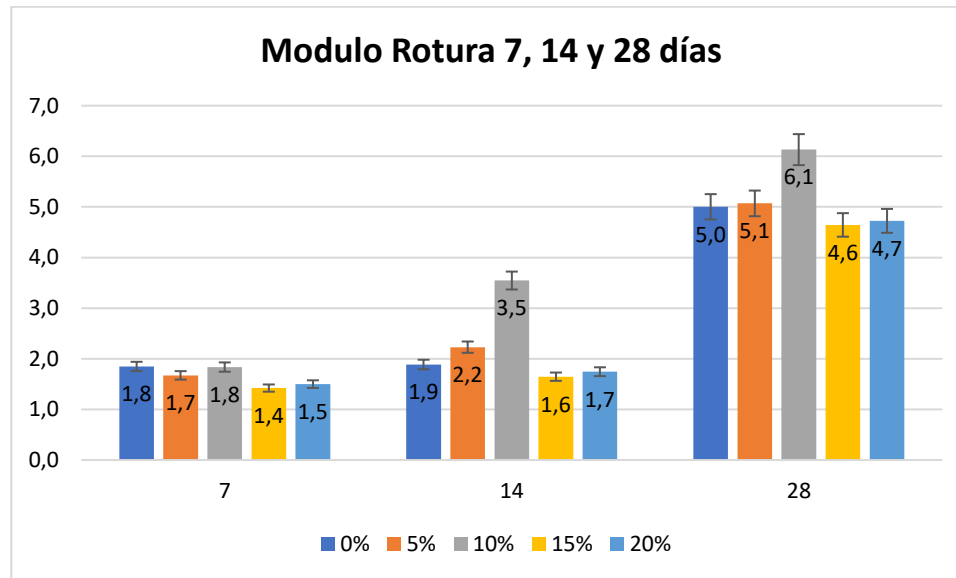
Tabla 27. Resistencias a la flexión de todos los adoquines fallados

ID	% Contenido de cemento	% Contenido de ceniza	Resistencia a la Flexión (Mpa)		
			7 días	14 días	28 días
Mezcla Patrón	100	0	1,8	1,9	5
Mezcla 1	95	5	1,7	2,2	5,1
Mezcla 2	90	10	1,8	3,5	6,1

AMBIENTAL Y SANITARIA

Mezcla 3	85	15	1,4	1,6	4,6
Mezcla 4	80	20	1,5	1,7	4,7

Gráfico 10. Resultados a 7, 14 y 28 días



En el grafico se evidencia que, de las 5 mezclas realizadas, la que presentó mejores resultados es la que fue diseñada con 10% de su contenido en cemento reemplazado por ceniza, presentándose así a los 14 y 28 días de curado por encima de la mezcla patrón, con valores de 3,5 y 6,1 Mpa respectivamente.

A los 7 días de curado, los especímenes presentaban una resistencia similar, obteniéndose una resistencia promedio de 1,64. Mientras que a los 14 días los adoquines realizados con el 100% de su contenido en cemento no presentaban una diferencia considerable en sus resultados, los especímenes realizados a partir de la mezcla 2 (10%) aumentaron considerablemente su resistencia.

Luego de los 28 días, la resistencia de los adoquines no varía considerablemente, por ello, se toma como resistencia final la que se obtiene a este tiempo de curado, las demás proporciones (5%, 15% y 20%) aunque no cumplieron con la resistencia a la que se había diseñado la mezcla inicialmente (5,4Mpa), si cumplen con lo requerido por la NTC 2017, que plantea un 4,2Mpa como promedio de 5 especímenes y 3,8Mpa para valores individuales de resistencia a la flexión.

Estos resultados revelan que el adoquín realizado con 10% de remplazo de cemento por ceniza presenta mayor eficiencia ya que permite obtener las mismas ventajas que uno convencional, y que, además de esto, ofrece un beneficio económico ya que hay una disminución del 10% en la inversión destinada al cemento. De igual manera, se obtiene un adoquín con mayor resistencia. Lo más significativo de ello es que según estudios realizados, un alto porcentaje de inquemados (más del 6%) afecta a la resistencia del concreto, y como se puede inferir, presentó una mejoría en cuanto a la propiedad de resistencia ya que esta fue mayor que la del adoquín al cual no se le implementó ceniza (teniéndose en cuenta que el porcentaje de inquemados de la ceniza de Termotasajero es de aproximadamente un 8%).

La NTC 3493 (NTC 3493. Normativa Técnica Colombiana, 2019) plantea un máximo contenido de inquemados del 6% para adicionar cenizas clase F a las mezclas de concreto, sin embargo, este parámetro está condicionado a que se permite hasta un 12% de inquemados si se evidencia un desempeño aceptable en los resultados obtenidos, en este caso, la resistencia de los adoquines.

Sobre la base de los resultados expuestos se puede asegurar que los adoquines ecológicos elaborados a partir de una mezcla con 10% de ceniza, son de buena calidad, ya que la resistencia a la flexión es un factor determinante a la hora de predecir la calidad del concreto.

7.4.3. Resultados de adoquines sometidos a prueba de Absorción de agua

La NTC 2017 (NTC 2017. Normativa Técnica Colombiana, 2018) establece la siguiente ecuación para determinar el % de absorción de agua de los adoquines:

$$\% \text{ Absorción} = \left(\frac{Mh - Ms}{Ms} \right) * 100$$

Donde:

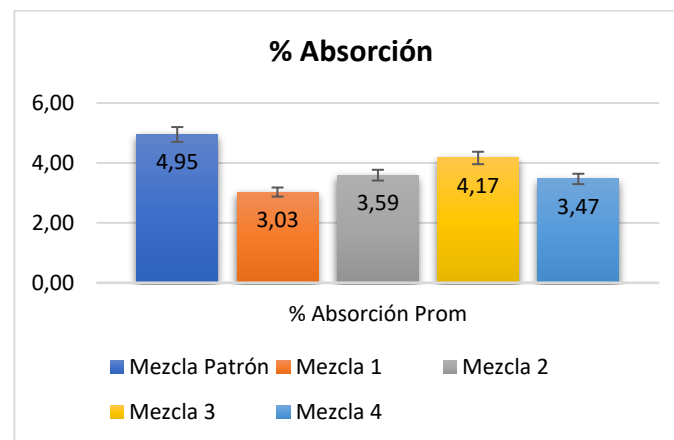
Mh = Masa saturada del espécimen.

Ms = Masa seca del espécimen.

Tabla 28. Datos de % de absorción de los adoquines

ID	% Absorción Prom
Mezcla Patrón	4,95
Mezcla 1	3,03
Mezcla 2	3,59
Mezcla 3	4,17
Mezcla 4	3,47

Gráfico 11. % de Absorción de los adoquines



Nota: Ver con detalle tabla en [Anexo AII](#)

La NTC 2017 establece que el % de absorción no debe ser superior a 8 por cada espécimen y a 7 si es un promedio de dos o más especímenes, por lo cual, en el gráfico anterior se evidencia que todos los especímenes cumplen con los requerimientos de la norma en cuanto al % de absorción.

La absorción de agua de los adoquines nos permite saber cuan porosos son estos, la porosidad está directamente relacionada con la absorción de agua de los especímenes ya que entre más vacíos tenga, mayor es el agua que se puede filtrar por los poros, y mayor será el porcentaje de absorción de la mezcla endurecida del concreto y de los elementos fabricados con ella, en este caso, los adoquines. La porosidad, al igual que la resistencia, nos da un indicio de la calidad final de los adoquines.

La mezcla que produjo adoquines con un menor porcentaje de absorción fue la mezcla 1 (5%) con un 3% de absorción. La mezcla 2 (10%), que fue la que obtuvo mejores resultados en cuanto a resistencia, obtuvo una absorción de agua de 3,6%, lo cual hace de los adoquines ecológicos elaborados de la mezcla 2 unos especímenes de calidad, con una amplia vida útil, ya que se traduce en buenas propiedades de durabilidad, debido a que entre menos porosidad tengan los prefabricados de concreto, menor es el agua que puede fluir por sus poros, lo cual hace que su desgaste sea menor.

7.5. Análisis entre la diferencia de los costos y beneficios que se obtienen al optar por la utilización de un adoquín ecológico o uno convencional

Comparación de costo que genera la elaboración de 1m³ de mezcla para elaborar adoquines convencionales con un contenido de 100% en cemento y 1m³ de mezcla reemplazando por ceniza el 10% del cemento requerido.

AMBIENTAL Y SANITARIA

Según “El Oficial” (2018), revista digital de construcción, los costos generales de una obra o proyecto se dividen en costos directos e indirectos. Ya que de los costos indirectos se derivan, de manera general, el equipo de construcción, mano de obra y transporte de materiales, el cálculo de estos será el mismo para los dos casos (las mezclas para adoquines convencional y ecológico).

La máquina produce 8 adoquines por plancha utilizada, esta tiene la capacidad de generar entre 800-1000 adoquines por día, sin ocurrencia de imprevistos y respetando las jornadas de horario laboral. Por lo tanto, se procede a calcular cuantos adoquines provienen de 1m³ de mezcla, para determinar cuántos días de trabajo se deben pagar:

- Cantidad de adoquines a elaborar de 1m³ de mezcla

$$1 \text{ adoquín} \rightarrow 0,0012 \text{ m}^3$$

$$X \rightarrow 1\text{m}^3$$

$$X = 833 \text{ adoquines.}$$

Ya que la maquina y el personal cuentan con la capacidad de elaborar hasta 1000 adoquines al día, solo se requiere el coste de 1 día de trabajo.

7.5.1. Costos Indirectos

Tabla 29. Costos indirectos del proceso de elaboración de adoquines

COSTOS INDIRECTOS DE LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES					
Ítem	Código	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	RH	Supervisor y mano de obra	5	\$ 40.000	\$ 200.000
2	SERV	Lugar, maquina, servicios	1	\$ 150.000	\$ 150.000
3	LOG	Logística	1	\$ 40.000	\$ 40.000



		Insumos que se requieran para la puesta en marcha de la máquina, planchas requeridas, etc.			
4	INS AD		30%	\$ 150.000	\$ 45.000
5	TRSP	Transporte	1	\$ 50.000	\$ 50.000
TOTAL					\$ 485.000
	IMPR	Imprevistos	10%		\$ 48.500
SUBTOTAL					\$ 533.500

Nota: Costos estimados. Elaboración propia.

7.5.2. Costo de 1m³ de mezcla para la elaboración de adoquines convencionales

7.5.2.1. Costes directos

Las proporciones para la elaboración de 1m² de mezcla para elaboración de adoquines convencionales se encuentran registrados en la tabla 24.

Los costos se indican a continuación:

Tabla 30. Costos directos de materiales e insumos consumibles - AD. CONV

COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES E INSUMOS CONSUMIBLES – CONV						
Ítem	Código	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
1	MAT	Cemento	372	Kilogramos	\$ 600	\$ 223.200
2		Arena Gruesa	627	Kilogramos	\$ 39	\$ 24.453
3		Arena Fina	1191	Kilogramos	\$ 20	\$ 23.820
SUBTOTAL						\$ 271.473

Nota: Costos estimados. Elaboración propia.

La realización de 1m³ de mezcla realizada de manera convencional para producir adoquines comúnmente comerciales, es decir, sin ningún porcentaje de ceniza o algún aditivo, representa unos

AMBIENTAL Y SANITARIA
costes directos de \$ 271.473 pesos, esto sumado a los costes indirectos que esta actividad produce, suma un gasto final de \$ 804.973 pesos.

7.5.2.2. Costo y Beneficio

La pavimentación articulada ofrece grandes ventajas, ya que tienen mayor resistencia a la abrasión del tráfico de llantas debido a la calidad que se le exige a estos en el momento de su fabricación (SÁNCHEZ CASTILLO, 2003), una vez instalados, los adoquines no requieren de un tiempo de curado como lo hacen los pavimentos de asfalto, son fáciles de instalar y además la utilización de estos disminuye el tiempo empleado en obra. En cuanto a su reparación ofrece la opción de reutilizar algunos adoquines, lo cual reduce costos y tiempo empleados en mantenimiento.

7.5.3. Costo de 1m³ de mezcla para la elaboración de adoquines ecológicos

7.5.3.1. Costes directos

Tabla 31. Diseño de mezcla de 1m³ de concreto con reemplazo de 10% de cemento por ceniza

Material	Prop. Peso	Prop. Vol	Masa mat. (kg)	Densidad (g/cm ³)	Vol. Abs. (dm ³)
Cemento	1	1	334,584	3,1	107,93
Ceniza	0,1	0,16	37,176	2,14 (1)	17,37
Agua	0,55	1,89	204,47	1	204,47
AG. Grueso	1,85	2,06	622,01	2,79	222,94
AG. Fino	3,52	4,14	1180,91	2,64	447,31
Σ	-	-	-	-	1000

Fuente: Elaborada por las autoras. (1). (ARRIETA TORDECILLA & PINZÓN BOGOTÁ, 2019) .

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \text{Vol. agua} - \text{Vol. cemento} - \text{Vol. ceniza}$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 670,23 \text{ dm}^3$$

$$G \text{ Prom.} = 2,69 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Masa de los agregados} = 670,23 * 2,69 = 1802,92 \text{ kg/m}^3 \text{ de concreto}$$

$$\text{Masa del agregado fino} = 1802,92 * 0,655 = 1180,91 \text{ kg/m}^3 \text{ de concreto}$$



$$\text{Masa del agregado grueso} = 1802,92 * 0,345 = 622,01 \text{ kg/m}^3 \text{ de concreto}$$

Tabla 32. Costos directos de materiales e insumos consumibles - AD. ECO

COSTOS DIRECTOS DE MATERIALES E INSUMOS CONSUMIBLES – ECO						
Ítem	Código	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Total
1	MAT	Cemento	335	Kilogramos	\$ 600	\$ 201.000
2		Arena Gruesa	622	Kilogramos	\$ 39	\$ 24.258
3		Arena Fina	1181	Kilogramos	\$ 20	\$ 23.620
4		Ceniza	38	Kilogramos	\$ 0	\$ 0
SUBTOTAL						\$ 248.878

Nota: Costos estimados. Elaboración propia.

Ilustración 6. Costo de envío de cenizas. Norte de Santander - Valledupar

Largo(cm.)	Alto(cm.)	Ancho(cm.)	Peso de la unidad(kg.)	Cantidad	Editar	Eliminar
65	15	42	38	1		

SOLICITAR COTIZACIÓN

Cotización: *Su cotización se ha procesado con éxito.*
 Días de entrega: 3
 Flete Total: \$51912

Nota: La imagen representa la cotización de costo de envío en caso de que se realice la actividad en Valledupar – Cesar y deba tenerse en cuenta este factor. (Coordinadora, 2021).

Adaptado, 20 de octubre de 2021 de: <https://www.coordinadora.com/portafolio-de-servicios/servicios-en-linea/cotizar-envio/>

La empresa de envíos Coordinadora maneja una tarifa de transporte de aproximadamente \$52.000 pesos para un paquete con un peso de 38 kg, desde Cúcuta hasta Valledupar; por lo tanto, para realizar 1 m³ de mezcla para la elaboración de adoquines ecológicos, en la ciudad de Valledupar, se debe tener en cuenta esta tarifa del transporte del material. En caso de que se elabore en el lugar de procedencia de la ceniza (Norte de Santander), no genera costos relevantes ya que estos estarían cubiertos en el presupuesto destinado a transporte en los costos indirectos de la obra.

En los costos directos de los adoquines ecológicos solo se tiene en cuenta el transporte de la ceniza ya que la termoeléctrica, por su parte, no exige un beneficio monetario al momento de la entrega de las cenizas, en caso tal de que se trate de un proyecto, como lo es el caso del presente estudio, la empresa incluso cubre los gastos de transporte.

El total de la realización de 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos con remplazo parcial de 10% de su contenido en cemento por ceniza, genera un valor de \$ 300.878 pesos de costos directos, esto sumado a los costos indirectos, da un total de \$ 834.378 pesos. Para adoquines realizados en la ciudad de Valledupar, donde debe considerarse el costo de transporte de las cenizas.

El total de la realización de 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos con remplazo parcial de 10% de su contenido en cemento por ceniza, genera un valor de \$ 248.878 pesos de costos directos, esto sumado a los costos indirectos, da un total de \$ 782.378 pesos. Para adoquines realizados en inmediaciones del lugar de procedencia de la ceniza (Norte de Santander).

7.5.3.2. Análisis Costo-Beneficio

Además de ofrecer todos los beneficios de un adoquín convencional, este adoquín ecológico es de gran ayuda al medio ambiente ya que se está reutilizando un desecho peligroso, las cenizas tienen alto contenido de material volátil, de ahí su nombre, cenizas volantes, por lo que esta propiedad hace de este material, principalmente un desecho perjudicial para los seres humanos ya que al ser un material que queda suspendido en el aire y se volatiliza con facilidad puede ingresar a las vías respiratorias con mucha facilidad.

Al optar por implementar adoquines ecológicos realizados con ceniza volante, se está obteniendo un adoquín con mayor resistencia que la mayoría de adoquines convencionales, una disminución en la inversión a realizar y además se ofrece un beneficio al medio ambiente y a los seres humanos al reutilizar un residuo que usualmente es acumulado.

Al escoger la opción de utilizar los adoquines ecológicos con un remplazo parcial del 10% de cemento por ceniza se está generando una disminución en costos de inversión para el cemento, por lo que es viable realizarlos. Lo que hace de esta opción la más viable económica y ambientalmente hablando es que se obtendrá un adoquín que reutiliza un residuo, contiene mayor o igual resistencia a adoquines comerciales y se verá una disminución en cuanto a inversión de materia prima (cemento).

La realización de 1m³ de mezcla para la confección de adoquines ecológicos ofrece una disminución del 2,8% con respecto al coste que conlleva realizar 1m³ de mezcla para adoquines convencionales (sin ningún tipo de aditivo fuera de los agregados grueso y fino, el cemento y el

AMBIENTAL Y SANITARIA

agua), si se realiza en inmediaciones al lugar de procedencia, es decir, lugares que colindan con el área en el que se encuentra la termoeléctrica.

Tabla 33. Costo de elaboración de 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos y adoquines convencionales realizados en la ciudad de Valledupar

	ADOQUÍN CONV	ADOQUÍN EC
COSTOS DIRECTOS	\$ 271.473,00	\$ 248.878,00
COSTOS INDIRECTOS	\$ 533.500,00	\$ 533.500,00
TRANSP. CENIZAS	-	\$ 52.000,00
TOTAL	\$ 804.973,00	\$ 834.378,00

Nota: Costos estimados. Elaboración propia.

Si los adoquines ecológicos son realizados en la ciudad de Valledupar y la termoeléctrica no asume los gastos de envío, se debe tener en cuenta los costes de transporte de las cenizas volantes, lo que representa un aumento en la inversión de la confección de los mismos; ya que para realizar 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos en Valledupar, hay un incremento del 3,5% en el coste con respecto a la realización de 1m³ de mezcla para adoquines convencionales. Esto es, si dado el caso la termoeléctrica no asume los gastos de transporte y entrega, ya que, para el actual proyecto, la termoeléctrica asumió todos los costes con lo relacionado a la obtención y envío de las cenizas.

Tabla 34. Costo de elaboración de 1m³ de mezcla para adoquines ecológicos y adoquines convencionales realizados en inmediaciones al lugar de procedencia de la ceniza (Termotasajero)

	ADOQUÍN CONV	ADOQUÍN EC
COSTOS DIRECTOS	\$ 271.473,00	\$ 248.878,00
COSTOS INDIRECTOS	\$ 533.500,00	\$ 533.500,00
TOTAL	\$ 804.973,00	\$ 782.378,00

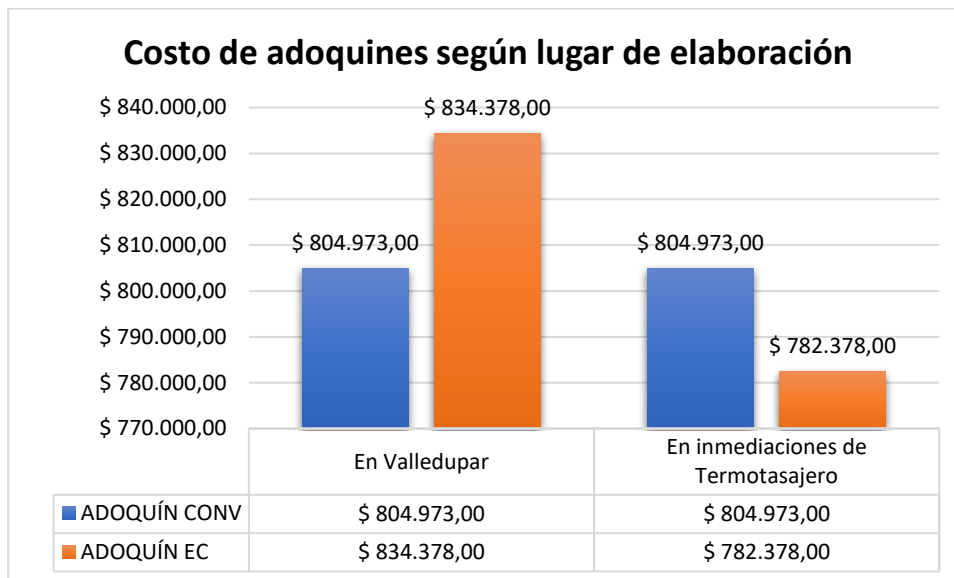
Nota: Costos estimados. Elaboración propia.

En proyectos que realice la termoeléctrica Termotasajero que requieran la implementación de pavimentos articulados, es viable implementar el proceso de confección de adoquines

AMBIENTAL Y SANITARIA

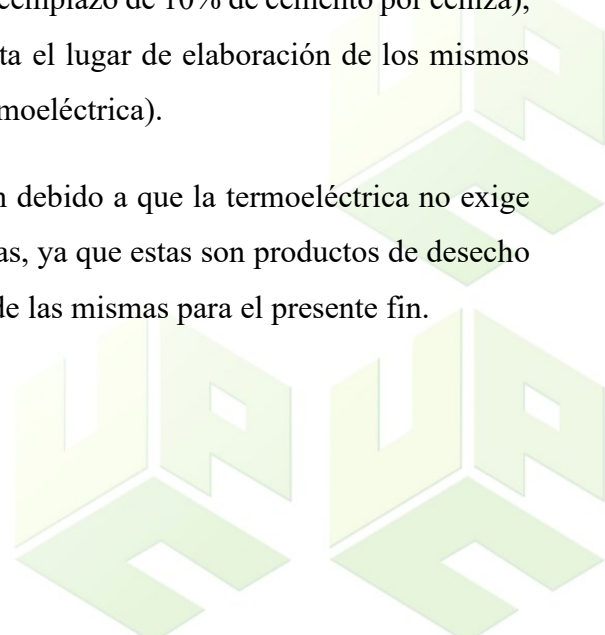
ecológicos, ya que representa una disminución en cuanto a costos de inversión (2,8%), por cada m³ de mezcla realizada (833 adoquines).

Gráfico 12. Gráfica comparativa de costos de 1m³ de mezcla para elaborar adoquines



El grafico presenta, en resumen, la comparativa de los costos de la elaboración de 1m³ de mezcla tanto para adoquines ecológicos (realizados con reemplazo de 10% de cemento por ceniza), como para adoquines convencionales, teniendo en cuenta el lugar de elaboración de los mismos (en la ciudad de Valledupar y en inmediaciones de la termoeléctrica).

El costo de las cenizas no entra en consideración debido a que la termoeléctrica no exige un reconocimiento monetario por la entrega de las cenizas, ya que estas son productos de desecho y aún no se encuentra contemplada la comercialización de las mismas para el presente fin.



8. CONCLUSIONES

Para la caracterización de las cenizas volantes provenientes de Termotasajero, fueron tomadas como referencia algunas investigaciones que contenían análisis realizados a este mismo material, proveniente de la misma termoeléctrica.

Los agregados finos y gruesos cumplen con la NTC 174, que establece especificaciones de los agregados finos y gruesos para el concreto; al momento de determinar la proporción de cada uno de los agregados, el método de Fuller fue el adecuado, ya que los adoquines realizados con cada una de las mezclas cumplieron con las resistencias mínimas que plantea la NTC 2017.

La NTC 3493 establece que el porcentaje de inquemados permisible para adicionar cenizas volantes a las mezclas de concreto es de 6%, sin embargo, según los análisis realizados por Romero & Hernández (2014) a las cenizas volantes de Termotasajero, presentan un porcentaje de inquemados de 7,8% lo cual se predice que es perjudicial para la resistencia del concreto en el cual se adicione ceniza volante ya que generan deficiencias en cuanto a las propiedades adherentes de la pasta de cemento, disminuyendo así su resistencia final. Sin embargo, los resultados para los adoquines realizados a partir de la mezcla realizada con un 10% de cemento reemplazado por ceniza (mezcla 2) fueron mejores que los adoquines realizados de la mezcla patrón, la cual no contenía ceniza, y a su vez la mezcla con el 10% de ceniza cumplió con la resistencia a la que se había proyectado que cumpliera finalmente los prefabricados realizados con la mezcla (5,4Mpa), obteniendo un valor de resistencia a la flexión de 6,1Mpa a los 28 días.

La prueba de absorción de agua fue satisfactoria tanto para la mezcla patrón como para todos los porcentajes de remplazo de ceniza (0%, 5%, 10%, 15% y 20%). El porcentaje de absorción de agua más alto fue el de la mezcla patrón, la cual no contenía ceniza en ninguna proporción. De igual manera, aunque los especímenes realizados a partir de la mezcla patrón hayan

presentado el porcentaje de absorción más elevado de todos los especímenes, no sobrepasa el valor establecido en la NTC 2017.

Los adoquines ecológicos, realizados con el 10% de su contenido en cemento por ceniza, presentan mejores resultados que cualquiera de las otras mezclas, tanto en el aspecto económico, como en el ambiental, ya que al momento de comparar los costos que genera la realización de 1m³ de mezcla para producir adoquines convencionales, es decir, sin ninguna proporción de ceniza, y 1m³ de mezcla la cual es elaborada con un reemplazo parcial del 10% de cemento por ceniza volante, es viable económicamente optar por la mezcla diseñada en el presente documento para producir estos prefabricados ecológicos. De lo expuesto anteriormente, se sabe que se obtiene un beneficio en cuanto a costos, sumado a ello se obtiene un beneficio medio ambiental y uno de calidad del producto resultante.

Debido a que las cenizas son un residuo que actualmente no obtiene ninguna utilidad relevante, una vez que el carbón se combustiona, las cenizas son objeto de desecho, al implementarlas en la confección de prefabricados de concreto puede traducirse en un descenso de contaminación por material particulado, una disminución en inversiones para patios de acopio destinados a almacenar estos residuos y un aporte a las propiedades finales del material, proporcionando mayor resistencia y disminuyendo su porcentaje de absorción, lo cual se traduce en un alargamiento de la vida útil del material.

Este estudio experimental ofrece la optimización del uso de ceniza como reemplazo parcial del cemento, lo cual nos permite un prefabricado competitivo, funcional, ecológico y de menor costo.

La termoeléctrica Termotasajero SA puede economizar en la inversión de materias primas que utilicen para la construcción de áreas o pavimentación de caminos peatonales, si emplean prefabricados los cuales contengan un 10% de reemplazo de cemento por la ceniza volante que producen normalmente en su proceso de generación de energía.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que en la elaboración de estos prefabricados el personal cuente con los Elementos de Protección Personal (EPP) pertinentes para que el uso de las cenizas volantes no se refleje en una afectación a su salud a largo plazo; además de que el lugar de realización de los adoquines esté a una distancia segura de la comunidad, ya que la ceniza es un material pulverulento que se volatiliza con facilidad.

Con los resultados obtenidos de las diferentes dosificaciones de mezcla se evidencia que la resistencia a la flexión cumple con lo establecido en la NTC 2017, sin embargo, se recomienda el uso de la dosificación que contiene un reemplazo de 10% del cemento por ceniza para la obtención de mejores resultados en cuanto a resistencia. Además, se propone, basados en los resultados y dimensiones de los adoquines, un uso en vías peatonales como parques y caminos con un tránsito peatonal.

Se recomienda seguir un procedimiento adecuado en las actividades que integran el proceso de la elaboración de adoquines para que los resultados en cuanto a resistencia y apariencia no resulten dispersos y desiguales.



REFERENCIAS

AEVERSU. (s.f.). Asociación empresarial Valorización R.S.U. *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*. España.

AMAT RODRIGO, J. (Enero de 2016). *Idea intuitiva del ANOVA*. Obtenido de ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias:
https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova

Areencias. (s.f.). *El carbón*. Obtenido de Origen y tipos de carbón:
<https://www.areencias.com/geologia/carbon/>

ARRIETA TORDECILLA, M. C., & PINZÓN BOGOTÁ, C. A. (2019). Análisis del comportamiento mecánico de muestras de concreto adicionadas con ceniza volante sometidas a la exposición de sulfatos. *Proyecto de grado*. BOGOTÁ, COLOMBIA: UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA.

ASTM C293, I. (2016). *Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto*. Obtenido de (Usando una Viga Simple con Carga al Centro del Claro):
https://www.techstreet.com/standards/astm-c293-c293m-16?product_id=1918100

BARLUENGA BADIOLA, G. (2008). *Conglomerantes y conglomerados*. Obtenido de MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.:
https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-04-28_04-14-5098256.pdf

BEDOYA GUTIERREZ, M. A. (2015). Efecto de los agregados reciclados y cenizas de carbón en la durabilidad de un mortero ecológico para su aplicación en Arrecifes Artificiales. *Efecto de los agregados reciclados y cenizas de carbón en la durabilidad de un mortero ecológico*

CABO LAGUNA, M. (Junio de 2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. *Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción*. Navarra, España: UNIVERSIDAD PUBLICA DE NAVARRA.

CABO, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Navarra, España: Universidad Publica de Navarra.

Caicedo Campo, S. L., & Pérez Henao, J. M. (2014). *Estudio del uso agregados reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de la ciudad de Cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana.

CAICEDO QUINAYÁS, C. S. (09 de 11 de 2016). *Pontificia Universidad JAVERIANA Cali*.
Obtenido de IHS:
http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/8072/Dise%C3%B1o_pavimento_articulado_adoquines.pdf?sequence=1

CEDEX. (2011). *Centro de estudios y experimentación de obras publicas*. Obtenido de <http://www.cedexmateriales.es/>

CEMEX. (s.f.). *Clínker, el ingrediente principal con el que se fabrica en cemento*. Obtenido de CEMEX: <https://www.cemex.es/productos-y-soluciones/clinker>

CHAVEZ VELASQUEZ, C. A., & GUERRA MAESTRE, Y. L. (2015). Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón Termotasajero. *Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón Termotasajero*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Trabajo de Grado.

AMBIENTAL Y SANITARIA

COA VALERIANO, C. (2018). Introducción a La Resistencia De Materiales. *Universidad Autónoma San Francisco. UASF-Institucional*. ALICIA. Acceso Libre a Información Científica para Innovación. Obtenido de Universidad Autónoma San Francisco.

CORTES, V. (2005). *Carbón* .

CUCUTA, A. D. (s.f.). *Cucutanuestra*. Obtenido de Cúcuta para el mundo: <https://www.cucutanuestra.com/temas/geografia/municipios/region-centro/san-cayetano/san-cayetano.htm>

DAVIS, M. L., & MASTEN, S. J. (2005). *Ingenierías y ciencias ambientales*.

DE LA IGLESIA CEBALLOS, J. M. (s.f.). *Operaciones y procesos. Ingeniería química y química inorgánica*. Obtenido de Open Course Ware. Universidad de Cantabria: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1313/course/section/1616/BLOQUE2-OyP.pdf>

EcuRed. (s.f.). *Periodo Carbonifero*. Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/Per%C3%ADodo_Carbon%C3%ADfero

EducarChile. (s.f.). *Carbón*. Obtenido de EducarChile: <https://www.aprendeconenergia.cl/carbon/>

Energía, M. d. (2003). MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. *Glosario Técnico Minero. GLOSARIO MINERO*. Bogotá, Colombia: REPÚBLICA DE COLOMBIA. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>

FACSA. (2017). *FACSA. Ciclo Integral del Agua*. Obtenido de Metales Pesados: <https://www.facsa.com/metales-pesados/>

GUERRERO BUSTOS, A. M. (11 de Junio de 2014). *Valorización de cenizas mediante tratamiento hidrotermal para su aplicación en materiales de construcción*. Madrid: CSIC.

HERRERA TORRES, G. (2007). *Diagnostico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de*

HUGGINS, F. (2002). Overview of analytical methods for inorganic constituents in coal.

IRIONDO, M. H. (2009). *Introducción a la geología*. Argentina: Brujas, Argentina.

León, J. d. (s.f.). *Tipos de carbón*. Obtenido de ENERGÍA Y MINERÍA. Junta de Castilla y León.:
<https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/tipos-carbon.html>

LÓPEZ CASTILLO, N. A., & HERNÁNDEZ MORA, A. N. (2018). OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTADOS A BASE DE CENIZAS VOLANTES COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND. *Proyecto de grado. INGENIERÍA CIVIL*. BOGOTÁ, COLOMBIA: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

Manual de reutilización de residuos de la industria minera. (1995). *INSTITUTO TECNOLOGICO GEOMINERO DE ESPAÑA*. España: Rivadeneyra, S.A.

MAPFRE. (s.f.). *Combustión*. Obtenido de Fundación MAPFRE:
<https://www.fundacionmapfre.org/publicaciones/diccionario-mapfre-seguros/combustion/>

Maps, G. (s.f.). *Ubicación geográfica*. Obtenido de Termotasajero S.A. (Termoelectrica):
<https://www.google.com/maps/place/Termotasajero/@7.867372,-72.6356194,12z/data=!4m8!1m2!2m1!1sTermotasajero+se+encuentra+ubicada+en+la+Av0+10-78+de+204+Colegio+M%C3%A9dico+C%C3%BAcuta+-+Norte+De+Santander!3m4!1s0x0:0xdccdfc61e566ab50!8m2!3d7.8478434!4d-72>

Maps, G. (s.f.). *Ubicación geográfica - Vista Satelital*. Obtenido de Termotasajero S.A. (Termoelectrica):
<https://www.google.com/maps/place/Termotasajero/@7.867372,-72.6356194,23635m/data=!3m1!1e3!4m8!1m2!2m1!1sTermotasajero+se+encuentra+ubicada>

AMBIENTAL Y SANITARIA

ada+en+la+Av0+10-78+de+204+Colegio+M%C3%A9dico+C%C3%BAcuta+-

+Norte+De+Santander!3m4!1s0x8e664c24622ee7ad:0xdccdfc61e566

Normas Técnicas y Certificación, I. (1993). *NTC 3493. Normativa Técnica Colombiana*. Obtenido de INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND.:
https://kupdf.net/queue/ntc-3493-aditivos-minerales_58f6e343dc0d608476da97ed_pdf?queue_id=-1&x=1629767830&z=MTkwLjE0LjI1MS4xNDg=

Normas Técnicas y Certificación, I. (2000). *NTC 174. Normativa Técnica Colombiana*. Obtenido de CONCRETOS. ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO.:
[file:///C:/Users/WINDOWS%2010/Downloads/NTC%20174%20de%202000%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/WINDOWS%2010/Downloads/NTC%20174%20de%202000%20(2).pdf)

Normas Técnicas y Certificación, I. (2018). *NTC 2017. Normativa Técnica Colombiana*. Obtenido de ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTO:
<https://pdfcoffee.com/ntc2017pdf-pdf-free.html>

Normas Técnicas y Certificación, I. (2018). *NTC 77. Normativa Técnica Colombiana*. Obtenido de MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS:
https://www.academia.edu/14595154/NTC_77_M%C3%89TODO_DE_ENSAYO_PARA_EL_AN%C3%81LISIS_POR_TAMIZADO_DE_LOS_AGREGADOS_FINOS_Y_GRUESOS

Normas Técnicas y Certificación, I. (2019). *NTC 3493. Normativa Técnica Colombiana*. Obtenido de Cenizas Volantes Y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto:
<https://tienda.icontec.org/gp-cenizas-volantes-y-puzolanas-naturales-calcinadas-o-crudas-para-uso-en-el-concreto-ntc3493-2019.html>

https://www.ecured.cu/Ladrillo_ecol%C3%B3gico

PEDRAJA, R. (1951). *Petroleo, electricidad, carbón y política en Colombia*. Bogotá, Colombia.

PEÑA URUEÑA, M. L. (2011). *Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersion Gamma-Gamma*. Universidad Nacional de Colombia.

POLANCO MADRAZO, J. A., & SETIÉN MARQUÍNEZ, J. (s.f.). *Cementos, morteros y hormigones*. Obtenido de Open Course Ware. Universidad de Cantabria.:
https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/868/3_Morteros_hormigones1.pdf

RIVERA L, G. A. (2013). *Concreto Simple*. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Rodríguez, A. (10 de 10 de 2018). *MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MC Uni2*. Obtenido de
https://www.youtube.com/watch?v=cTqpjUN_gw0

ROMERO QUINTERO, A. F., & HERNÁNDEZ RICO, J. C. (2014). *Diseño de mezclas de hormigón por el método A.C.I. y efectos de la adición de cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para obtener el título de ingeniero civil*. BOGOTÁ, COLOMBIA: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

S.A., A. C. (1999). *Guía ambiental para termoelectricas y procesos de cogeneracion, para aire y ruido*. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Colombia.

SÁNCHEZ CASTILLO, X. A. (2003). *Diseño de pavimentos articulados para tráfico medio y alto*. Tesis de grado. BOGOTÁ, COLOMBIA: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.

SUPERMIX. (s.f.). *ADOQUINES*. Obtenido de Concretos SUPERMIX:
<https://www.supermix.com.pe/adoquines/>

TERMOTASAJERO. (s.f.). *Termotasajero, Colgener*. Obtenido de Termotasajero, Colgener, S.A.:

http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=33

THENOUX ZEBALLOS, G. (2010). Adofaltos: adoquines para pavimentos articulados fabricados con mezclas asfálticas en frío con emulsiones y ceniza FBC. *Adofaltos: adoquines para pavimentos articulados fabricados con mezclas asfálticas en frío con emulsiones y ceniza FBC*. Antofagasta, Chile: Universidad Católica del Norte.

TORRES GOMEZ, A. I. (04 de Marzo de 2018). Valorización de cenizas volantes de plantas de producción de energía y residuos de construcción y demolición en morteros industriales. . *Valorización de cenizas volantes de plantas de producción de energía y residuos de construcción y demolición en morteros industriales*. . Córdoba , Belmez, Colombia: Tesis Doctoral.

UPME. (2016). *Unidad de Planeación Minero Energética*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía: https://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf

URIBE, C. (1986). *Introducción a la tecnología del carbón, origen, composición, propiedades y clasificación*. INGEOMINAS.

VASSILEV, J. (2002). *Method for Characterization of Inorganic and Mineral Matter in Coal: A Critical Overview*. (Vol. 17). Energy & Fuels.

VELASQUEZ, L., DE LA CRUZ, J., SANCHEZ, J., & MARIN, M. (2007). Investigaciones del carbón . *Escuela de Procesos y Energía, Uniersidad Nacional de Colombia del Centro*. Bogotá , Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Wicitec. (05 de 11 de 2018). *Costos directos e indirectos de una obra civil*. Obtenido de El Oficial. INFORMACIÓN QUE CONSTRUYE.: <https://eloficial.ec/modulo-3-analisis-de-costos-costos-directos-e-indirectos-de-una-obra-civil/>



ANEXOS

ANEXO AI

Relación entre dimensiones de los especímenes

[↩ \(Volver a lectura\)](#)

	ID	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)
	0 - A	20,2	10,2	6,4
<i>Relación entre dimensiones</i>			1,98	3,16
	0 - B	20,2	10	6,2
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,02	3,26
	5 - A	20,3	9,9	6,5
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,05	3,12
	5 - B	20,2	10	6,4
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,02	3,16
	10 - A	20,3	10	6,4
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,03	3,17
	10 - B	20,2	10	6,4
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,02	3,16
	15 - A	20,3	10,1	6,2
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,01	3,27
	15 - B	20,2	10,2	6,5
<i>Relación entre dimensiones</i>			1,98	3,11
	20 - A	20,1	10	6,6
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,01	3,05
	20 - B	20,2	10	6,4
<i>Relación entre dimensiones</i>			2,02	3,16

Nota: Relación entre Longitud/Ancho y Longitud/Espesor de los especímenes.

Longitud/Ancho < 2,5 (NTC 2017. Normativa Técnica Colombiana, 2018)

Longitud/Espesor < 5 (NTC 2017. Normativa Técnica Colombiana, 2018)

ANEXO AII

- A los 7 días

ID	Adoquines Ecológicos P1
LONGITUD INSCRITA (li)	200 mm
ANCHO INSCRITO (ai)	100 mm
ESPESOR INSCRITO (ei)	60 mm
Longitud entre Apoyos (la) en mm	150

Nota: Dimensiones inscritas de adoquines y longitud entre apoyos al momento de fallarlos a flexión.

[↩ \(Volver a lectura\)](#)

ID	Longitud Real (lr) en mm	Ancho Real (Ar) en mm	Espesor Real (Er) en mm	Área Real (Ar) en mm ²	Fuerza en N	Modulo Rotura (Mr) en Mpa	Modulo Rotura Prom (Mr) en Mpa
0 – A	200	100	64	20000	4430	2,43	1,85
0 – B	200	100	64	20000	2300	1,26	
5 – A	202	100	64	20200	2730	1,5	1,67
5 – B	201	100	64	20100	3360	1,85	
10 – A	203	100	63	20300	4720	2,68	1,84
10 – B	203	100	63	20300	1760	1	
15 – A	204	102	63	20808	3030	1,68	1,42
15 – B	202	102	62	20604	2020	1,16	
20 – A	203	101	64	20503	2930	1,59	1,5
20 – B	204	100	64	20400	2560	1,41	

Nota: Dimensiones de cada espécimen y resultado de fallas, valores individuales y promedio.

ANEXO AIII

- A los 14 días

ID	Adoquines Ecológicos P2
LONGITUD INSCRITA (li)	200 mm
ANCHO INSCRITO (ai)	100 mm
ESPESOR INSCRITO (ei)	60 mm
Longitud entre Apoyos (la) en mm	150

Nota: Dimensiones inscritas de adoquines y longitud entre apoyos al momento de fallarlos a flexión.

[↩ \(Volver a lectura\)](#)

ID	Longitud Real (lr) en mm	Ancho Real (Ar) en mm	Espesor Real (Er) en mm	Área Real (Ar) en mm ²	Fuerza en N	Modulo Rotura (Mr) en Mpa	Modulo Rotura Prom (Mr) en Mpa
0 – A	202	102	64	20604	5400	2,91	1,89
0 – B	202	100	62	20200	1480	0,87	
5 – A	203	99	65	20097	5940	3,2	2,23
5 – B	202	100	64	20200	2320	1,27	
10 – A	203	100	64	20300	8380	4,6	3,55
10 – B	202	100	64	20200	4530	2,49	
15 – A	203	101	62	20503	2870	1,66	1,65
15 – B	202	102	65	20604	3120	1,63	
20 – A	201	100	66	20100	4980	2,57	1,74
20 – B	202	100	64	20200	1670	0,92	

Nota: Dimensiones de cada espécimen y resultado de fallas, valores individuales y promedio.

ANEXO AIV

- A los 28 días

ID	Adoquines Ecológicos P3
LONGITUD INSCRITA (li)	200 mm
ANCHO INSCRITO (ai)	100 mm
ESPESOR INSCRITO (ei)	60 mm
Longitud entre Apoyos (la) en mm	150

Nota: Dimensiones inscritas de adoquines y longitud entre apoyos al momento de fallarlos a flexión.

[↩ \(Volver a lectura\)](#)

ID	Longitud Real (lr) en mm	Ancho Real (Ar) en mm	Espesor Real (Er) en mm	Área Real (Ar) en mm ²	Fuerza en N	Modulo Rotura Individual (Mri) en Mpa	Modulo Rotura Prom (Mr) en Mpa
0 – A	202	100	62	20200	8900	5,21	5
0 – B	200	100	63	20000	8460	4,8	
5 – A	200	100	64	20000	9560	5,25	5,07
5 – B	200	100	64	20000	8890	4,88	
10 – A	201	101	63	20301	11960	6,71	6,13
10 – B	202	100	61	20200	9180	5,55	
15 – A	201	100	63	20100	8610	4,88	4,64
15 – B	201	100	61	20100	7290	4,41	
20 – A	200	100	62	20000	8750	5,12	4,73
20 – B	201	100	66	20100	8380	4,33	

Nota: Dimensiones de cada espécimen y resultado de fallas, valores individuales y promedio.

ANEXO AV

[↩ \(Volver a lectura\)](#)

ID	Masa antes de inmersión (kg)	Masa después de inmersión (kg)	% Absorción	% Absorción Prom
Mezcla Patrón	2,735	2,805	2,56	4,95
	2,18	2,34	7,34	
Mezcla 1	2,53	2,615	3,36	3,03
	2,595	2,665	2,7	
Mezcla 2	2,505	2,615	4,39	3,59
	2,685	2,76	2,79	
Mezcla 3	2,47	2,58	4,45	4,17
	2,45	2,545	3,88	
Mezcla 4	2,485	2,585	4,02	3,47
	2,58	2,655	2,91	

Nota: Masas antes y después de inmersión al agua de los especímenes.

ANEXO BI

Datos complementarios de Humedad y granulometría de agregado grueso

DATOS DE LA HUMEDAD	
PESO RECIP + MAT. HUMEDO (g)	100
PESO RECIP + MAT. SECO (g)	95
PESO DEL AGUA (g)	5
PESO DEL RECIPIENTE (g)	0
PESO DEL MATERIAL SECO (g)	95
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	5,26

DATOS DEL MATERIAL GRANULOMETRÍA	
PESO MATERIAL + RECIPIENTE	2000
PESO DEL RECIPIENTE	0
PESO MAT. HUMEDO	2000
PESO DEL AGUA	105,26
PESO MATERIAL SECO	1894,7

ANEXO BII

Datos complementarios de Humedad y granulometría de agregado grueso

DATOS DE LA HUMEDAD	
PESO RECIP + MAT. HUMEDO (g)	100
PESO RECIP + MAT. SECO (g)	93
PESO DEL AGUA (g)	7
PESO DEL RECIPIENTE (g)	0
PESO DEL MATERIAL SECO (g)	93
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,53

DATOS DEL MATERIAL GRANULOMETRIA	
PESO MATERIAL + RECIPIENTE	2000
PESO DEL RECIPIENTE	0
PESO MAT. HUMEDO	2000
PESO DEL AGUA	150,54
PESO MATERIAL SECO	1849,46

ANEXO CI

Fotografías tomadas por las autoras (Alexandra Amaya Ardila – Mavis Marcela Hernández Castro). Laboratorio de granulometría de los agregados.

Figura 7. Lavado de agregado fino para prueba de humedad



Figura 8. Agregado fino con humedad natural



Figura 9. Agregados fino y grueso



Figura 10. Peso de agregado grueso



Figura 11. Realización de prueba granulométrica de agregado



Figura 12. Peso agregado fino



Figura 13. Lavado de agregado



Figura 14. Ceniza enviada por Termotasajero



Figura 15. Apariencia de ceniza volante



Figura 16. Proceso de peso del material



Figura 17. Proceso de lavado y peso del material



ANEXO CII

Fotografías tomadas por las autoras (Alexandra Amaya Ardila – Mavis Marcela Hernández Castro). Realización de las mezclas y adoquines con las distintas dosificaciones.

Figura 18. Ceniza en la mezcla

Figura 20. Proceso de mezclado de los agregados



Figura 19. Agregados y ceniza



Figura 21. Mezcla final



Figura 24. Maquina compactando la mezcla en los moldes
 Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Figura 22. Mezcla en la maquina



Figura 23. Distribución de la mezcla en las áreas de cada adoquín

Figura 25. Adoquines realizados



Figura 26. Adoquines húmedos



Figura 27. Adoquines resultantes de cada diseño de mezcla

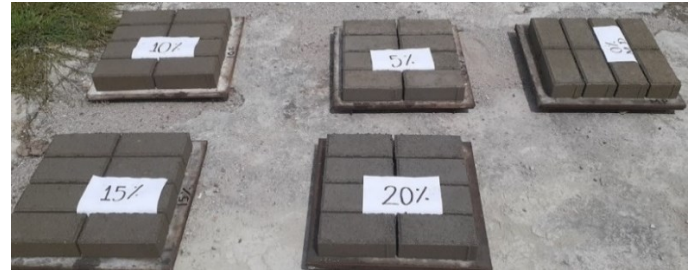
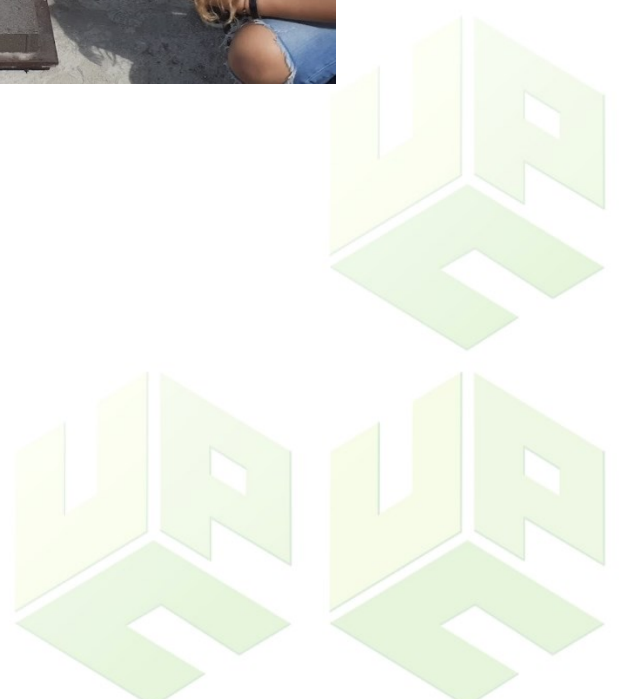


Figura 28. Rotulado de planchas



ANEXO CIII

Fotografías tomadas por las autoras (Alexandra Amaya Ardila – Mavis Marcela Hernández Castro). Laboratorio de falla de los especímenes a los 7 días de curado.

*Figura 29. Medición de dimensiones de adoquín,
7 días de curado*



Figura 30. Máquina ensayo a flexión



*Figura 31. Montaje de adoquín para falla a los 7
días de curado*



*Figura 32. Adoquín fracturado a los 7 días de
curado*



Figura 33. Resultado de Ensayo a los 7 días de curado



Figura 34. Resultado de ensayo a los 7 días de curado



Figura 35. Medición de dimensiones de especímenes a los 7 días de curado



Figura 36. Medición de dimensiones de adoquín a los 7 días de curado





ANEXO CIV

Fotografías tomadas por las autoras (Alexandra Amaya Ardila – Mavis Marcela Hernández Castro). Laboratorio de falla de los especímenes a los 14 días de curado.

Figura 38. Adoquín para someter a falla a flexión a 14 días de curado



Figura 40. Adoquín para someter a falla a los 14 días de curado



Figura 39. Adoquín para someter a falla a flexión a los 14 días de curado



Figura 41. Resultado de falla a flexión a los 14 días de curado



Figura 42. Adoquines fracturados a los 14 días de curado



Figura 43. Proceso de medición de adoquines



Figura 44. Adoquines luego de jalla a los 14 días de curado



ANEXO CV



Ilustración 45. Adoquín para someter a falla a los 28 días de curado



Ilustración 46. Adoquín fallado a los 28 días de curado



Figura 47. Resultado de falla a los 28 días de curado



Figura 48. Resultado de falla a los 28 días de curado



Figura 49. Apariencia interior final seca del espécimen



Figura 50. Fractura de adoquín a los 28 días



Figura 51. Adoquines fracturados a los 28 días de curado



ANEXO CVI

Fotografías tomadas por las autoras (Alexandra Amaya Ardila – Mavis Marcela Hernández Castro). Prueba de absorción de agua de los especímenes.

Figura 52. Peso de espécimen



Figura 53. Adoquines antes de sumergir en el agua

Figura 54. Especímenes sumergidos en el agua para prueba de absorción



Figura 55. Adoquín húmedo, luego de 24 horas de sumergido



Figura 56. Peso de adoquín



Figura 57. Apariencia superior de adoquín



Figura 58. Apariencia lateral de adoquín

