

Influence of Eucalyptus Ash as Partial Cement Replacement in Hydraulic Concrete Pavements with $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Infante Becerra Stalin Alexander¹; Rodriguez Rodriguez Jonathan Jackson²; Felix Alejandra Velásquez Huayta³

^{1,3} Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú. N00285788@upn.pe, felix.velasquez@upn.edu.pe, ²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca- Perú. N00291554@upn.pe.

Abstract—This research evaluates the effect of domestically sourced eucalyptus ash as a partial substitute for cement in hydraulic concrete for pavements, designed for a characteristic compressive strength of $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Mixtures were prepared with substitution percentages of 0%, 5%, 15%, and 20%, and evaluated through compressive and flexural strength tests at 7, 14, and 28 days. The results show a progressive decrease in mechanical properties as the ash content increases. At 28 days, the control mixture reached 254.84 kg/cm^2 in compression and 42.41 kg/cm^2 in flexure, while the mixture with 20% ash showed reductions of up to 35% and 22%, respectively. It is important to note that the ash used comes from domestic combustion processes, which introduces variability in its physical and chemical characteristics, potentially affecting water absorption and cement hydration. Despite the decrease in strength, eucalyptus ash has potential for non-structural applications or low-stress pavements, contributing to the valorization of waste and the reduction of cement consumption.

Keywords— Hydraulic concrete, compressive strength, flexural strength, eucalyptus ash, sustainability.

Resumen—La presente investigación evalúa el efecto de la ceniza de eucalipto de origen doméstico como sustituto parcial del cemento en concreto hidráulico para pavimentos, diseñado para una resistencia característica de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Se elaboraron mezclas con porcentajes de sustitución de 0%, 5%, 15% y 20%, evaluadas mediante ensayos de resistencia a la compresión y flexión a edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados muestran una disminución progresiva de las propiedades mecánicas conforme aumenta el contenido de ceniza. A los 28 días, la mezcla patrón alcanzó $254,84 \text{ kg/cm}^2$ en compresión y $42,41 \text{ kg/cm}^2$ en flexión, mientras que la mezcla con 20% de ceniza presentó reducciones de hasta 35% y 22%, respectivamente. Cabe destacar que la ceniza utilizada proviene de procesos de combustión doméstica, lo cual introduce variabilidad en sus características físicas y químicas, pudiendo afectar la absorción de agua y la hidratación del cemento. A pesar de la disminución en resistencia, la ceniza de eucalipto presenta potencial para aplicaciones no estructurales o pavimentos de baja sollicitación, contribuyendo a la valorización de residuos y reducción del consumo de cemento.

Palabras clave— Concreto hidráulico, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, ceniza de eucalipto, sostenibilidad.

I. INTRODUCTION

La industria de la construcción ha sido históricamente una de las principales fuentes de impacto ambiental, particularmente debido a la producción de cemento Portland, proceso que contribuye de manera significativa a las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2). Frente a este escenario, la investigación en ingeniería civil ha orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de materiales alternativos y estrategias sostenibles que permitan reducir el consumo de cemento, sin comprometer el desempeño mecánico del concreto.

En este contexto, diversos estudios han evaluado la incorporación de residuos de origen vegetal e industrial como sustitutos parciales del cemento, aprovechando sus propiedades puzolánicas y su disponibilidad local. Entre estos materiales se encuentran las cenizas provenientes de biomasa vegetal, las cuales, bajo condiciones adecuadas de procesamiento y dosificación, pueden contribuir a la mejora de la microestructura del concreto y a la reducción de su huella ambiental.

Investigaciones previas han analizado el uso de diferentes tipos de cenizas como sustituto parcial del cemento. Estudios con ceniza de coco reportaron resistencias a la compresión comprendidas entre 27.31 MPa y 21.40 MPa a los 28 días para reemplazos entre 15% y 30%, evidenciando una reducción progresiva de la resistencia, aunque con beneficios ambientales asociados a la disminución del calentamiento global [1]. De manera similar, la combinación de ceniza de cáscara de arroz con arcilla calcinada permitió obtener incrementos de hasta 33% en la resistencia a la compresión y una reducción significativa de la porosidad, demostrando el potencial de estos materiales como cementos de bajo carbono [2].

Otros trabajos han explorado el uso de adiciones minerales como cenizas volantes y materiales de alta finura, tales como ALCCOFINE, reportando incrementos de hasta 20% en la resistencia a la compresión en concretos de alta resistencia [3]. En el ámbito de pavimentos rígidos, investigaciones con ceniza de cabuya mostraron mejoras tanto en la resistencia a la compresión como a la flexión para sustituciones bajas (1%–5%), permitiendo incluso reducir el espesor de losas [4]. Resultados similares fueron observados

en estudios con ceniza volante, donde reemplazos del 5% lograron resistencias máximas a compresión, mientras que porcentajes mayores generaron disminuciones en el desempeño mecánico [5].

Asimismo, el uso de cenizas de bagazo de caña de azúcar, cáscara de maní y otros residuos orgánicos ha evidenciado que, si bien pequeñas proporciones pueden mantener propiedades aceptables del concreto, incrementos elevados en el porcentaje de sustitución tienden a reducir significativamente la resistencia a la compresión y a la flexión [6], [8], [9]. Los porcentajes de sustitución seleccionados (5%, 15% y 20%) se definieron en base a antecedentes bibliográficos, particularmente lo reportado en [7], donde se evidencian reducciones progresivas en la resistencia mecánica conforme aumenta el contenido de ceniza. Asimismo, se incluyó un porcentaje bajo (5%) para evaluar su viabilidad técnica, y porcentajes mayores (15% y 20%) para analizar el comportamiento del material bajo condiciones más exigentes y validar su aplicabilidad en contextos locales.

A pesar de estos antecedentes, los estudios sobre el uso de ceniza de eucalipto como sustituto parcial del cemento en concreto para pavimentos rígidos siguen siendo limitados a nivel regional, especialmente en contextos donde existe una alta disponibilidad forestal de eucalipto, como es el caso de la región Cajamarca. En este sentido, resulta necesario profundizar en la evaluación experimental de este material, considerando porcentajes de sustitución moderados y su efecto sobre las propiedades mecánicas del concreto.

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico de un pavimento de concreto hidráulico diseñado para una resistencia característica de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, incorporando ceniza de eucalipto como sustituto parcial del cemento en proporciones de 0%, 5%, 15% y 20%. El estudio se centra en el análisis de la resistencia a la compresión y a la flexión a edades de curado de 7, 14 y 28 días, con el fin de determinar la viabilidad técnica y ambiental de este material como alternativa sostenible para aplicaciones de concreto en usos no estructurales.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo y enfoque de la investigación

La presente investigación es de tipo experimental, con un enfoque cuantitativo y comparativo, cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de eucalipto en las propiedades mecánicas del concreto hidráulico diseñado para una resistencia característica de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

El diseño experimental contempló cuatro dosificaciones de concreto con porcentajes de sustitución de cemento de 0%, 5%, 15% y 20%, realizándose tres repeticiones por tratamiento, tanto para los ensayos de resistencia a la compresión como para los ensayos de resistencia a la flexión,

con el fin de garantizar la confiabilidad y repetibilidad de los resultados.

B. Materiales empleados

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

- El agregado fino y el agregado grueso fueron obtenidos de la cantera Aguilar, seleccionados por cumplir con los requisitos granulométricos y de limpieza para concreto hidráulico, considerando experiencias previas que evidencian la influencia del proceso de lavado del agregado en la resistencia a la compresión del concreto [10].
- Cemento Portland Tipo I, marca Pacasmayo, empleado como material cementante base.
- Ceniza de eucalipto, recolectada de cocinas domésticas de la ciudad de Cajamarca – Perú, utilizada como sustituto parcial del cemento.
- Agua, de calidad potable, apta para la elaboración de concreto, libre de impurezas orgánicas o químicas.

C. Caracterización de los materiales

C.1. Análisis granulométrico de los agregados

El análisis granulométrico del agregado fino y grueso se realizó conforme a la norma ASTM C136, mediante el tamizado de una muestra seca de masa conocida a través de una serie de tamices normalizados, con el fin de verificar el cumplimiento de las curvas granulométricas establecidas en la ASTM C33 [11].

$$M.F = \frac{\% \text{Retenido acumulado mallas}}{100} \quad (1)$$

Los tamices utilizados fueron:

- Agregado grueso: N° 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N° 4, 8, 16, 30, 50 y 100
- Agregado fino: N° 4, 8, 16, 30, 50 y 100

C.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad de los agregados se determinó conforme a la norma ASTM D2216, secando las muestras en horno a una temperatura de $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas, hasta alcanzar masa constante. El porcentaje de humedad se calculó mediante la expresión: [12].

$$W \% = \left[\frac{W_{mh} - W_{ms}}{W_{ms}} \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

W_h = peso de la muestra húmeda (kg)

W_s = peso de la muestra seca (kg)

C.3. Peso específico y absorción de los agregados

El peso específico y la absorción del agregado grueso y fino se determinaron de acuerdo con las NTP 400.021 y NTP 400.022, respectivamente. La absorción se definió como la cantidad de agua absorbida por el agregado luego de 24 horas de inmersión, parámetro fundamental para el ajuste del contenido de agua en el diseño de mezcla y para asegurar una adecuada trabajabilidad y durabilidad del concreto [13], [14].

D. Diseño de mezclas y elaboración de probetas

Se diseñaron cuatro mezclas de concreto mediante el método **ACI211.1** – *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, considerando una resistencia característica de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ [15].

- Mezcla patrón (0% de ceniza de eucalipto)
- Mezcla con 5% de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto
- Mezcla con 15% de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto
- Mezcla con 20% de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto

La ceniza de eucalipto sustituyó parcialmente al cemento en proporción en peso. Las probetas cilíndricas y viguetas fueron elaboradas, compactadas y curadas conforme a los procedimientos establecidos en las normas técnicas correspondientes.

E. Ensayos al concreto fresco

E.1. Asentamiento del concreto (Slump)

El ensayo de asentamiento del concreto fresco se realizó conforme a la norma ASTM C143, utilizando el cono de Abrams para evaluar la consistencia y trabajabilidad de las mezclas. Se trabajó con una consistencia plástica, con valores de asentamiento comprendidos entre 7,62 y 10,16 cm, aplicando el procedimiento estándar de tres capas y 25 golpes por capa [16].

F. Ensayos al concreto endurecido

F.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó en probetas cilíndricas de concreto a los 7, 14 y 28 días de curado, conforme a la NTP 339.034 y ASTM C39/C39M, con el fin de evaluar la capacidad resistente del concreto elaborado con diferentes porcentajes con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por de ceniza de eucalipto [17], [18]. La resistencia se calculó mediante la expresión:

$$\delta = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Donde:

P = carga máxima aplicada (kg)

A = área de la sección transversal de la probeta (cm^2)

F.2. Resistencia a la flexión (módulo de rotura)

El ensayo de resistencia a la flexión se realizó en viguetas de concreto a los 28 días de curado, de acuerdo con la ASTM C78/C78M y la NTP 339.080, para analizar el comportamiento del concreto frente a esfuerzos de flexión, característicos de los pavimentos rígidos [19], [20]. determinando el módulo de rotura mediante la expresión:

$$fr = \frac{P * L}{b * h^2} \quad (4)$$

Donde:

P = carga máxima aplicada (kg)

L = distancia entre apoyos (cm)

b = ancho de la vigueta (cm)

h = altura de la vigueta (cm)

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para el concreto hidráulico con resistencia de diseño $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, elaborado con sustitución parcial del cemento por ceniza de eucalipto en proporciones de 0%, 5%, 15% y 20%.

A. Caracterización de los materiales

A.1. Análisis granulométrico de los agregados

Los resultados del análisis granulométrico del agregado fino se presentan en la Tabla I y su respectiva curva granulométrica en la Fig. 1. El agregado fino mostró una distribución continua de tamaños de partícula, con un módulo de finura de 3,67, correspondiente a una arena relativamente gruesa, la cual se mantiene dentro de los rangos establecidos por la norma ASTM

TABLA I
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO

Tamiz		% Que pasa		
Nº	(mm)	Ensayo	Estándar	
Nº 4	4,75	80,2	95%	100%
Nº 8	2,36	59,2	80%	100%
Nº 16	1,18	44,2	50%	85%
Nº 30	0,6	30,1	25%	60%
Nº 50	0,3	14,3	5%	30%
Nº 100	0,15	4,8	-	10%
Nº 200	0,075	1	-	5%

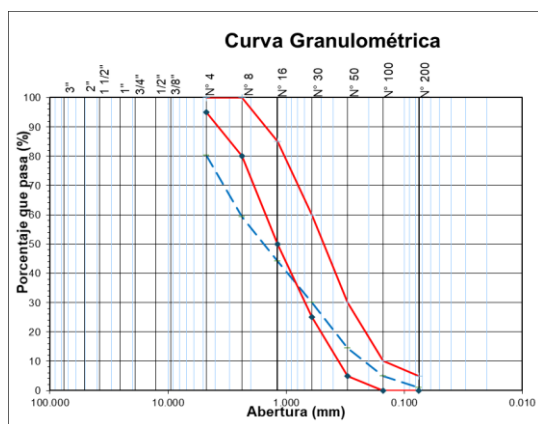


Fig. 1 Curva granulométrica del agregado fino.

De manera similar, la Tabla II y la Fig. 2 muestran la granulometría del agregado grueso, el cual presenta un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ", cumpliendo con los límites normativos para concreto hidráulico y favoreciendo una adecuada compactación de la mezcla.

TABLA II
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO

Tamiz		% Que pasa		
Nº	(mm)	Ensayo	Estándar	
1 "	25	99%		
3/4 "	19	64%	90%	100%
1/2 "	12,5	20%	47%	75%
3/8 "	9,5	25%	20%	55%
Nº 4	4,75	1%	0%	10%

Tamaño Máximo (TM): $\frac{3}{4}$ "

Tamaño Máximo Nominal (TMN): 1"

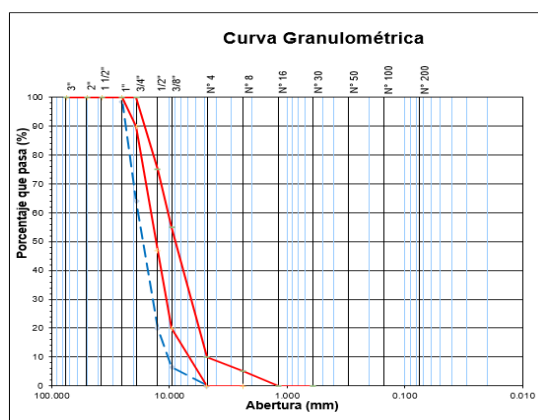


Fig. 2 Curva granulométrica del agregado grueso.

A.2. Propiedades físicas de los agregados

La Tabla III presenta un resumen de las principales propiedades físicas del agregado fino y del agregado grueso utilizadas en el diseño de mezcla, incluyendo contenido de

humedad, peso específico, absorción y peso unitario. Los valores mostrados corresponden a los promedios obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio y fueron considerados para el ajuste del diseño de mezcla.

TABLA III
PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS.

	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso unitario	1400,72 kg/m ³	1548,39 kg/m ³
Peso específico de masa	2,75	2,60
Absorción	2,38 %	1,12 %
Contenido de humedad	1,29 %	0,99 %

Nota: Los valores corresponden a los promedios obtenidos de los ensayos de laboratorio.

B. Diseño de mezcla y dosificación

La dosificación final de los materiales para cada porcentaje de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto se muestra en la Tabla IV.

TABLA IV
DOSIFICACIÓN DE CONCRETO $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

	Und.	0%	5%	15%	20%
Cemento	kg	13,66	12,97	11,60	10,92
Agua	litros	7,50	7,50	7,50	7,50
Agregado Grueso	kg	32,02	32,02	32,02	32,02
Agregado Fino	kg	29,90	29,90	29,90	29,90
Ceniza	kg	-	0,70	2,06	2,74

Se mantuvieron constantes las cantidades de agua y agregados, variando únicamente el contenido de cemento y ceniza de eucalipto, la cual sustituyó parcialmente al cemento en proporción en peso.

C. Resistencia a la compresión

En esta sección se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión obtenidos en probetas cilíndricas de concreto hidráulico con resistencia de diseño $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, elaboradas con sustitución parcial del cemento por ceniza de eucalipto en proporciones de 0%, 5%, 15% y 20%. Las probetas fueron ensayadas a edades de 7, 14 y 28 días.

C.1. Probetas con 0% de ceniza de eucalipto (mezcla patrón)

La Tabla V presenta los resultados de resistencia a la compresión de la mezcla patrón. Los valores obtenidos fueron $212,85 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días, $229,12 \text{ kg/cm}^2$ a los 14 días y $254,84 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, evidenciando un incremento progresivo de la resistencia con la edad de curado.

TABLA V
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROJETAS CON 0% DE CENIZA
EULALIPTO (PATRÓN)

Días de curado	Área (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
7 días	176,71	37613	212,85
14 días	176,71	40488	229,12
28 días	176,71	45032	254,84

C.2. Projetas con 5% de ceniza de eucalipto

Los resultados correspondientes a la mezcla con 5% de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto se presentan en la Tabla VI. Las resistencias obtenidas fueron 175,82 kg/cm² a los 7 días, 183,97 kg/cm² a los 14 días y 199,46 kg/cm² a los 28 días, mostrando un aumento de la resistencia conforme avanza el curado.

TABLA VI
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROJETAS CON 5% DE CENIZA
EULALIPTO

Días de curado	Área (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
7 días	176,71	31070	175,82
14 días	176,71	32510	183,97
28 días	176,71	35247	199,46

C.3. Projetas con 15% de ceniza de eucalipto

En la Tabla VII se muestran los resultados de resistencia a la compresión para la mezcla con 15% de ceniza de eucalipto, registrándose valores de 156,81 kg/cm² a los 7 días, 165,34 kg/cm² a los 14 días y 170,47 kg/cm² a los 28 días.

TABLA VII
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROJETAS CON 15% DE CENIZA
EULALIPTO

Días de curado	Área (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
7 días	176,71	27710	156,81
14 días	176,71	29217	165,34
28 días	176,71	30123	170,47

C.4. Projetas con 20% de ceniza de eucalipto

Los resultados de resistencia a la compresión correspondientes a la mezcla con 20% de ceniza de eucalipto se presentan en la Tabla VIII. Se obtuvieron resistencias de 138,85 kg/cm² a los 7 días, 159,24 kg/cm² a los 14 días y 164,30 kg/cm² a los 28 días.

TABLA VIII
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROJETAS CON 20% DE CENIZA
EULALIPTO

Días de curado	Área (cm ²)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Compresión (kg/cm ²)
7 días	176,71	24536	138,85
14 días	176,71	28140	159,24
28 días	176,71	29034	164,30

Como se puede ver en la Fig. 3 de manera general, los resultados muestran que todas las mezclas presentan un incremento de resistencia con la edad de curado. Asimismo, se observa que la mezcla patrón alcanzó los mayores valores de resistencia a la compresión en las tres edades evaluadas, mientras que las mezclas con sustitución parcial de cemento por ceniza de eucalipto registraron resistencias progresivamente menores conforme aumentó el porcentaje de reemplazo.

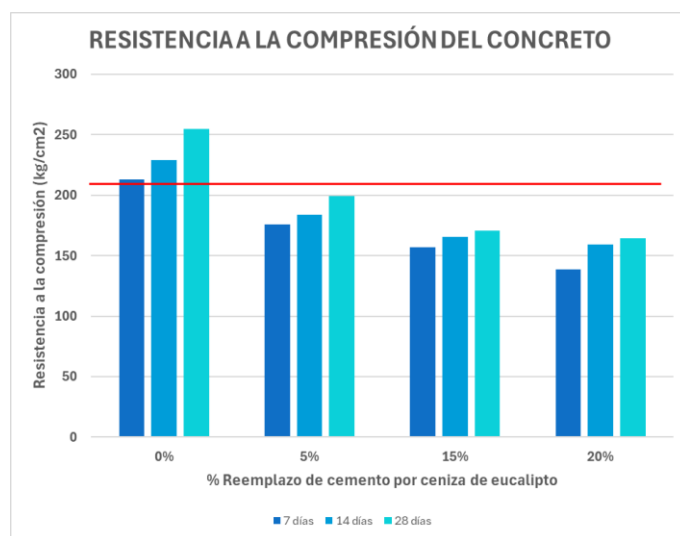


Fig. 3 Evolución de la resistencia a la compresión promedio del concreto a 7, 14 y 28 días para diferentes reemplazos del cemento por ceniza de eucalipto.

A los 28 días, la mezcla patrón (0% de ceniza de eucalipto) alcanzó una resistencia promedio de 254,84 kg/cm², superando la resistencia de diseño. Las mezclas con sustitución parcial de cemento por ceniza de eucalipto registraron resistencias promedio de 199,46 kg/cm² (5%), 170,47 kg/cm² (15%) y 164,30 kg/cm² (20%).

Estos valores muestran una disminución progresiva de la resistencia a la compresión conforme aumenta el porcentaje de sustitución del cemento por ceniza de eucalipto.

D. Resistencia a la flexión (módulo de rotura)

En esta sección se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la flexión (módulo de rotura) obtenidos en probetas prismáticas de concreto hidráulico con resistencia de diseño $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, elaboradas con sustitución parcial del cemento por ceniza de eucalipto en proporciones de 0%, 5%, 15% y 20%. Las probetas fueron ensayadas a edades de 7, 14 y 28 días.

D.1. Probetas con 0% de ceniza de eucalipto (mezcla patrón)

La Tabla IX presenta los resultados de resistencia a la flexión correspondientes a la mezcla patrón. Los valores obtenidos fueron $29,69 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días, $37,11 \text{ kg/cm}^2$ a los 14 días y $42,41 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, con la edad de curado.

TABLA IX
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN PROBETAS CON 0% DE CENIZA EUCALIPTO (PATRÓN)

Días de curado	Largo (cm)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Flexión (kg/cm ²)
7 días	50	2227	29,69
14 días	50	2783	37,11
28 días	50	3181	42,41

D.2. Probetas con 5% de ceniza de eucalipto

Los resultados del ensayo de flexión para la mezcla con 5% de sustitución de cemento por ceniza de eucalipto se presentan en la Tabla X. Las resistencias a la flexión obtenidas fueron $26,95 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días, $33,68 \text{ kg/cm}^2$ a los 14 días y $38,49 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.

TABLA X
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN PROBETAS CON 5% DE CENIZA EUCALIPTO

Días de curado	Largo (cm)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Flexión (kg/cm ²)
7 días	50	2021	26,95
14 días	50	2526	33,68
28 días	50	2887	38,49

D.3. Probetas con 15% de ceniza de eucalipto

En la Tabla XI se muestran los resultados de resistencia a la flexión para la mezcla con 15% de ceniza de eucalipto, registrándose valores de $24,49 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días, $30,61 \text{ kg/cm}^2$ a los 14 días y $34,99 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.

TABLA XI
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN PROBETAS CON 15% DE CENIZA EUCALIPTO

Días de curado	Largo (cm)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Flexión (kg/cm ²)
7 días	50	1837	24,49
14 días	50	2296	30,61
28 días	50	2624	34,99

D.4. Probetas con 20% de ceniza de eucalipto

Los resultados correspondientes a la mezcla con 20% de ceniza de eucalipto se presentan en la Tabla XII. Se obtuvieron resistencias a la flexión de $23,04 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días, $28,81 \text{ kg/cm}^2$ a los 14 días y $32,93 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.

TABLA XII
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN PROBETAS CON 20% DE CENIZA EUCALIPTO

Días de curado	Largo (cm)	Carga Máxima (kg)	Resistencia Flexión (kg/cm ²)
7 días	50	1728	23,04
14 días	50	2161	28,81
28 días	50	2470	32,93

Como se puede ver en la Fig. 4 de manera general, los resultados muestran que todas las mezclas presentan un incremento de la resistencia a la flexión con la edad de curado. Asimismo, se observa que la mezcla patrón alcanzó los mayores valores de resistencia a la flexión en las tres edades evaluadas, mientras que las mezclas con sustitución parcial de cemento por ceniza de eucalipto registraron valores progresivamente menores conforme aumentó el porcentaje de reemplazo.

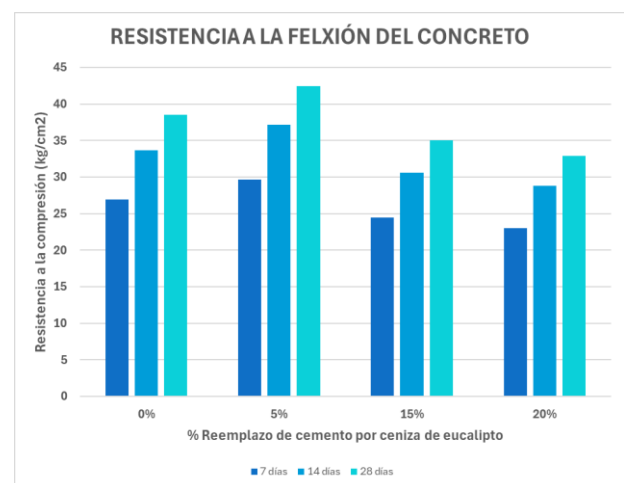


Fig. 4 Evolución de la resistencia a la flexión promedio del concreto a 7, 14 y 28 días para diferentes reemplazos del cemento por ceniza de eucalipto.

A los 28 días, la mezcla patrón presentó una resistencia promedio a la flexión de 42,41 kg/cm². Las mezclas con sustitución parcial de cemento por ceniza de eucalipto alcanzaron valores promedio de 38,49 kg/cm² (5%), 34,99 kg/cm² (15%) y 32,93 kg/cm² (20%), evidenciando una reducción del módulo de rotura a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza incorporada.

Se recomienda realizar una caracterización físico - química de la ceniza de eucalipto para determinar su potencial puzolánico y explicar su influencia en la resistencia del concreto. Asimismo, es importante controlar su granulometría (tamizado) y superficie específica, debido a su efecto en la demanda de agua y la hidratación del cemento. Se sugiere incrementar el número de probetas y aplicar análisis estadísticos para mejorar la confiabilidad de los resultados. Además, se debe evaluar el comportamiento del concreto en términos de durabilidad (permeabilidad, absorción, resistencia a agentes agresivos) y su desempeño a largo plazo.

VI. DISCUSSION

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de eucalipto produce una disminución progresiva de la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto hidráulico $f'c = 210$ kg/cm², efecto que se intensifica a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Medina Gamboa (2024) [7], quien identificó una reducción significativa de la resistencia mecánica al emplear ceniza de eucalipto como sustituto del cemento, atribuyéndola a la limitada actividad puzolánica del material y a la alteración de la matriz cementicia.

Resultados similares han sido documentados en investigaciones que emplean residuos agroindustriales sin tratamiento previo, como la cáscara de maní y la ceniza volante, donde se reporta una pérdida gradual de resistencia conforme se incrementan los porcentajes de sustitución del cemento [5], [9]. Estos estudios coinciden en que, si bien dichos materiales aportan beneficios ambientales, su incorporación en proporciones elevadas afecta negativamente el desempeño mecánico del concreto.

En contraste, otros autores han reportado mejoras parciales o incrementos de resistencia cuando se utilizan materiales cementantes suplementarios bajo condiciones específicas. Investigaciones que combinan cenizas con materiales altamente reactivos, como arcillas calcinadas o adiciones minerales finamente molidas, han demostrado una mejora en la microestructura del concreto y un aumento de la resistencia a largo plazo [2], [3]. Estas diferencias se explican por el tratamiento térmico, la finura del material y la sinergia entre los componentes cementantes, condiciones que no se presentan en la ceniza de eucalipto empleada en el presente estudio.

Asimismo, estudios como el de Melena y Peñafiel (2023) [5] reportan incrementos en la resistencia a la flexión con

mayores porcentajes de sustitución; sin embargo, dichos resultados corresponden a materiales reciclados con características físicas y químicas distintas, así como a diseños de mezcla y resistencias objetivo-diferentes, lo que limita su comparación directa con los resultados obtenidos en esta investigación.

En el caso específico de la ceniza de eucalipto, la reducción de resistencia puede atribuirse a su menor capacidad de reacción con los productos de hidratación del cemento y a una posible interferencia en la formación del gel C-S-H, generando una matriz menos densa y con mayor porosidad. Este comportamiento explica la disminución observada tanto en la resistencia a la compresión como en el módulo de rotura, especialmente en dosificaciones superiores al 5%.

En conjunto, los resultados del presente estudio se alinean con la literatura que señala que la incorporación de residuos orgánicos o agroindustriales como sustitutos parciales del cemento debe realizarse en proporciones bajas y bajo condiciones controladas, priorizando su aplicación en elementos de baja exigencia mecánica cuando no se dispone de tratamientos que mejoren su reactividad.

Es importante señalar que la ceniza utilizada proviene de procesos de combustión doméstica sin control de temperatura ni condiciones de quema, lo cual introduce variabilidad en sus propiedades físicas y químicas. Asimismo, la ausencia de una caracterización mineralógica y química limita la interpretación completa de su comportamiento como material cementante suplementario.

V. CONCLUSION

En consecuencia, la ceniza de eucalipto, en su estado no tratado, no puede considerarse un sustituto eficiente del cemento para aplicaciones estructurales, pero sí representa una alternativa sostenible viable en aplicaciones de baja exigencia mecánica. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión del concreto hidráulico $f'c = 210$ kg/cm² con sustitución parcial de cemento por ceniza de eucalipto, se concluye lo siguiente:

- La sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de eucalipto genera una reducción progresiva de la resistencia mecánica del concreto, tanto a compresión como a flexión, efecto que se mantiene en todas las edades de curado evaluadas (7, 14 y 28 días).
- La mezcla patrón (0% de ceniza) presentó los mayores valores de resistencia, evidenciando que la incorporación de ceniza de eucalipto sin tratamiento previo no mejora el desempeño estructural del concreto destinado a pavimentos rígidos.
- La dosificación con 5% de ceniza mostró una disminución moderada de la resistencia, manteniéndose relativamente cercana a la mezcla patrón en comparación con los porcentajes superiores, aunque sin superar el desempeño del concreto convencional.
- Las mezclas con 15% y 20% de sustitución presentaron reducciones significativas de resistencia, lo que limita su

aplicación en elementos estructurales o pavimentos de tránsito medio y alto.

- Desde un enfoque ambiental, el uso de ceniza de eucalipto contribuye a la reducción del consumo de cemento Portland y a la valorización de residuos forestales, por lo que su aplicación resulta viable principalmente en elementos no estructurales.
- Los resultados confirman que la ceniza de eucalipto, en las condiciones evaluadas, no presenta una actividad puzolánica suficiente para sustituir el cemento en proporciones elevadas sin afectar el desempeño mecánico del concreto hidráulico.

VI. RECOMMENDATIONS

Con base en los resultados y conclusiones del presente estudio, se recomienda:

- Evaluar el comportamiento del concreto con ceniza de eucalipto a edades mayores de curado, con el fin de analizar su desarrollo de resistencia a largo plazo.
- Investigar la combinación de ceniza de eucalipto con otros materiales cementantes suplementarios, como ceniza volante o escoria, que puedan compensar la pérdida de resistencia observada.
- Considerar la aplicación del concreto con ceniza de eucalipto en elementos no estructurales o pavimentos de bajo tránsito, donde se priorice el enfoque ambiental y la sostenibilidad sobre las altas exigencias mecánicas.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por el respaldo institucional y las facilidades brindadas para el desarrollo de la presente investigación, en especial al laboratorio de materiales y concreto, por permitir el uso de sus instalaciones y equipos necesarios para la ejecución de los ensayos experimentales.

Asimismo, se reconoce de manera especial el valioso acompañamiento y orientación de la Mg. Ing. Felix Alejandra Velásquez Huayta, cuyo asesoramiento académico y técnico fue fundamental para el correcto desarrollo, análisis y culminación de este estudio.

Finalmente, se agradece al personal técnico del laboratorio por su apoyo durante las etapas de elaboración, curado y ensayo de las probetas de concreto, así como a todas las personas que, de forma directa o indirecta, contribuyeron a la realización del presente trabajo de investigación.

REFERENCES

- [1] K. S. Ranatunga, E. del Rey Castillo, and C. L. Toma, "Evaluation of the optimal concrete mix design with coconut shell ash as a partial cement replacement," *Construction and Building Materials*, vol. 401, p. 132978, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132978.
- [2] J. M. Marangu *et al.*, "Durability of ternary blended concrete incorporating rice husk ash and calcined clay," *Buildings*, vol. 14, no. 5, p. 1201, 2024, doi: 10.3390/buildings14051201.

- [3] U. S. Ansari, "High performance concrete with partial replacement of cement by ALCCOFINE and fly ash," 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/275521731>
- [4] J. I. Díaz Paucar, *Efectos de la ceniza de cabuya como sustitución parcial del cemento en la durabilidad y sostenibilidad del concreto $f'c = 210$ kg/cm² con fines de pavimento rígido de mediano tránsito*, Tesis de pregrado, Univ. Continental, Perú, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/16383>
- [5] S. Huaquisto Cáceres and G. Belizario Quispe, "Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento," *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 20, no. 2, pp. 225–234, 2018, doi: 10.18271/ria.2018.366.
- [6] A. Huilca and W. Rodríguez, "Efectos de la sustitución parcial de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar en el asentamiento y resistencia a la compresión del concreto," *Revista Politécnica*, vol. 54, no. 2, pp. 109–117, 2024, doi: 10.33333/rp.vol54n2.10.
- [7] N. E. Medina Gamboa, *Variación de la resistencia a compresión del concreto $f'c = 210$ kg/cm² al sustituir el cemento Portland tipo I por ceniza de eucalipto*, Tesis de pregrado, Univ. Nacional de Cajamarca, Perú, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.14074/7480>
- [8] V. L. Angulo Zavaleta, *Influencia de la adición al 2%, 3% y 5% de ceniza volante en las propiedades físico-mecánicas del mortero de cemento*, Tesis de pregrado, Univ. Privada del Norte, Perú, 2022.
- [9] J. B. De La Cruz Huamán, *Influencia en la resistencia a la compresión y flexión de la combinación de cáscara de mani molido y polvillo de aluminio reciclado en reemplazo parcial del cemento*, Tesis de pregrado, Univ. Privada del Norte, Perú, 2022.
- [10] J. A. Cerdán Estela and B. S. Manosalva Campos, *Influencia del proceso de lavado del agregado de las canteras Bazán, Aguilar y Banda en la resistencia a la compresión del concreto $f'c = 210$ kg/cm²*, Tesis de pregrado, Univ. Privada del Norte, Perú, 2024.
- [11] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 400.012: Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*, Lima, Perú, 2013.
- [12] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.127: Método de ensayo para determinar el contenido de humedad*, Lima, Perú, 2019.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *AASHTO T 84: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*, Washington, D.C., USA.
- [14] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), *Manual de Ensayo de Materiales – Norma 400.022: Absorción de los agregados*, Lima, Perú, 2016.
- [15] ACI Committee 211, *ACI 211.1: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [16] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.035: Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*, Lima, Perú, 2009.
- [17] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.034: Método de determinación de la resistencia a la compresión del concreto*, Lima, Perú, 2008.
- [18] ASTM International, *ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] ASTM International, *ASTM C78/C78M: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, West Conshohocken, PA, USA.
- [20] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.080: Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto*, Lima, Perú.