



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Influencia de la inclusión de las cenizas de huesos de ganado vacuno en  
el comportamiento mecánico de morteros

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autor:**

Cárdenas Valencia, Bryan Rafael  
Simbaña Cazar, Jofre Fabián

**Tutor:**

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés

**Riobamba, Ecuador. 2026**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, **Bryan Rafael Cárdenas Valencia**, con cédula de ciudadanía 1600719494 y **Jofre Fabian Simbaña Cazar**, con cédula de ciudadanía 2200387302, autores del trabajo de investigación titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE LAS CENIZAS DE HUESOS DE GANADO VACUNO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS”**, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 02 de mayo de 2026.

---

Bryan Rafael Cárdenas Valencia

C.I: 1600719494

---

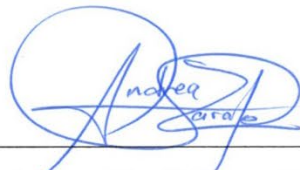
Jofre Fabián Simbaña Cazar

C.I: 2200387302

## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE LAS CENIZAS DE HUESOS DE GANADO VACUNO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS”**, bajo la autoría de Bryan Rafael Cárdenas Valencia y Jofre Fabián Simbaña Cazar; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 9 días del mes de junio de 2026.



---

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés

C.I: 0604079772

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE LAS CENIZAS DE HUESOS DE GANADO VACUNO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS**”, presentado por **Bryan Rafael Cárdenas Valencia**, con cédula de identidad número 1600719494 y **Jofre Fabian Simbaña Cazar** con cédula de identidad número 2200387302, bajo la tutoría de Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 9 de junio de 2026.

Ing. Marcelo David Guerra Valladares, MGs.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Ing. Jennifer Elizabeth Pino Arguello, MGs.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---

Ing. Marco Javier Palacios Carvajal, MGs.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



---



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO

*en movimiento*



UNACH-RGF-01-04-08.15  
VERSIÓN 01: 06-09-2021

# CERTIFICACIÓN

Que, **Cárdenas Valencia Bryan Rafael** con CC: **1600719494** y **Simbaña Cazar Jofre Fabian** con CC: **2200387302**, estudiantes de la Carrera **Ingeniería Civil**, Facultad de **Ingeniería**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **Influencia de la inclusión de las cenizas de huesos de ganado vacuno en el comportamiento mecánico de morteros**", cumple con el 8 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Compilatio Magister+**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 05 de junio de 2026

Ing. Andrea Zárate  
TUTOR(A)

## DEDICATORIA

**A mi madre, Mary**, por su amor incondicional, su apoyo constante y por estar siempre a mi lado en cada paso de mi vida. Gracias por creer en mí, por brindarme fortaleza en los momentos difíciles y por ser uno de los pilares fundamentales que me impulsaron a alcanzar esta meta.

**A mi padre, Mario**, por su ejemplo de responsabilidad, esfuerzo y perseverancia. Gracias por estar siempre pendiente de mí, por cada consejo brindado en el momento oportuno y por el apoyo que me ha acompañado a lo largo de mi formación personal y profesional.

**A mi hermana, July**, quien ha sido una fuente permanente de inspiración. Su dedicación, constancia y ejemplo de superación me motivaron a seguir adelante durante mi carrera universitaria. Gracias por acompañarme en gran parte de este camino, por tu confianza y por demostrarme que con esfuerzo y disciplina es posible alcanzar los sueños.

**A mi familia**, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa tan importante de mi vida. Cada palabra de aliento y cada gesto de confianza contribuyeron a que hoy pueda culminar este logro.

Finalmente, dedico esta tesis a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso: amigos, docentes y compañeros, quienes aportaron con sus enseñanzas, consejos, conocimientos y apoyo durante mi formación académica. Cada uno dejó una huella significativa en mi crecimiento personal y profesional.

***Bryan Rafael Cárdenas Valencia***

**A mi padre, Carlos** por apoyarme siempre en mis estudios, por ser una guía a lo largo de mi vida y acompañarme siempre a pesar de las dificultades.

**A mi madre, Olivia** por acompañarme y estar a mi lado siempre que lo necesité, por brindarme cariño y amor, por no soltar mi mano en cada paso, gracias mamá.

**A mis hermanos, Carlos y Mariana** por apoyarme incondicionalmente en todo sentido siempre que lo necesité, brindándome una mano a pesar de sus necesidades.

**A mi compañero, Joselito** por haberme acompañado toda la vida hasta su deceso y ser aquella luz que le dio brillo a mis días brindándome motivación y felicidad.

***Jofre Fabian Simbaña Cazar***

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar esta importante etapa de mi vida. Gracias por acompañarme en cada desafío, iluminar mi camino y permitirme alcanzar una de las metas más significativas de mi formación profesional.

A mi tutora, Ing. Andrea Zárate, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para la ejecución de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por proporcionar los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación. De igual manera, expreso mi sincero agradecimiento a todos los docentes que formaron parte de mi proceso educativo, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, aportando de manera significativa a mi formación.

A mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor, comprensión, apoyo incondicional y confianza durante cada etapa de mi formación académica.

A mi compañero de tesis, por su dedicación, compromiso y compañerismo a lo largo de este proceso investigativo. Gracias por la paciencia demostrada en cada desafío, por afrontar juntos las dificultades que surgieron durante el desarrollo de este trabajo y por mantener siempre la disposición de buscar soluciones para seguir avanzando.

***Bryan Rafael Cárdenas Valencia***

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios por darme salud, vida, fuerzas para seguir adelante, por haber estado conmigo siempre acompañándome en esta larga travesía llamada vida y haberme hecho conocer a las personas correctas a lo largo de la misma.

A mi familia por haberme dado compañía siempre que lo necesité, por brindarme valores y educación a lo largo de mi vida.

A mi tutora la Ingeniera Andrea Zárate, por haber sido una gran guía a lo largo del desarrollo de este proyecto, por cumplir con sus responsabilidades de forma respetuosa, paciente y amable.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por acogerme y abrirme las puertas a una educación de calidad, adicionalmente agradezco a todas las personas que contribuyeron a mi formación y me brindaron conocimiento para mejorar tanto académica como personalmente.

Agradezco a mi compañero de tesis por enfrentar este desafío conmigo y estar tanto en las buenas como en las malas, siempre dispuesto a dar una mano cuando más se necesitaba.

***Jofre Fabian Simbaña Cazar***

## ÍNDICE GENERAL;

DECLARATORIA DE AUTORÍA .....	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR .....	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL .....	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO.....	
DEDICATORIA .....	
AGRADECIMIENTO .....	
ÍNDICE GENERAL; .....	
ÍNDICE DE TABLAS .....	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	
ABSTRACT .....	
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1    Antecedentes .....	16
1.2    Planteamiento del problema.....	17
1.3    Justificación .....	17
1.4    Objetivos.....	18
1.4.1    Objetivo General .....	18
1.4.2    Objetivos Específicos .....	18
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO. ....</b>	<b>19</b>
2.1    Estado del Arte.....	19
2.2    Marco Teórico.....	20
2.2.1    Evolución de resistencia del cemento.....	20
2.2.2    Materiales cementantes suplementarios.....	20
2.2.3    Puzolanicidad .....	21
2.2.4    Calcinación de material orgánico .....	21
2.3    Marco conceptual .....	21

2.3.1	Materiales Aglutinantes .....	21
2.3.2	Mortero .....	21
2.3.3	Material cementante.....	21
2.3.4	Dosificación .....	22
2.3.5	Agregados .....	22
2.3.6	Material óseo .....	22
2.3.7	Tipos de osamentas.....	22
2.3.8	Fémur .....	23
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA. ....</b>		<b>24</b>
3.1	Tipo de Investigación .....	24
3.2	Diseño de Investigación.....	25
3.2.1	Fase 1: Revisión Bibliográfica .....	25
3.2.2	Fase 2: Recolección del material y dosificación .....	26
3.2.2.1	Cenizas de huesos de ganado vacuno .....	26
3.2.2.2	Agregado Fino .....	28
3.2.2.3	Cemento.....	29
3.2.2.4	Dosificación.....	30
3.2.3	Fase 3: Ensayos de laboratorio.....	30
3.2.3.1	Fluidez del mortero .....	30
3.2.3.2	Resistencia a la compresión.....	31
3.2.3.3	Resistencia a la flexión.....	31
3.3	Técnicas de recolección de datos .....	31
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra.....	32
3.5	Métodos de análisis y procesamiento de datos .....	32
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>34</b>
4.1	Análisis de resultados .....	34
4.1.1	Fase 1: Método AHP .....	34

4.1.2	Fase 2: Caracterización de materiales y dosificación .....	36
4.1.2.1	Caracterización de las cenizas .....	36
4.1.2.2	Caracterización del agregado fino .....	43
4.1.2.3	Dosificación.....	44
4.1.3	Fase 3: Ensayos de Laboratorio.....	45
4.1.3.1	Fluidez de mortero .....	45
4.1.3.2	Resistencia a la compresión en cubos de 50x50x50 mm .....	46
4.1.3.3	Resistencia a la Flexión en vigas de 40x40x160 mm .....	51
4.1.4	Coefficientes de correlación de Spearman.....	52
4.1.4.1	Temperatura – Resistencia .....	52
4.1.4.2	Tiempo de calcinación – Resistencia.....	53
4.1.4.3	Porcentaje de reemplazo – Resistencia .....	53
4.2	Discusión.....	54
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>56</b>
5.1	Conclusiones .....	56
5.2	Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFÍA .....		57
ANEXOS.....		62

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Fases de la resistencia del cemento .....	20
<b>Tabla 2</b> Límites de tamizado para agregado fino.....	22
<b>Tabla 3</b> Escala fundamental de comparación por pares (Método AHP).....	25
<b>Tabla 4</b> Ensayos realizados para la caracterización física de las cenizas.....	28
<b>Tabla 5</b> Coordenadas UTM de donde proviene el agregado fino .....	29
<b>Tabla 6</b> Densidad del cemento tipo GU .....	29
<b>Tabla 7</b> Cantidad de materiales para elaborar seis y nueve especímenes de mortero.....	30
<b>Tabla 8</b> Tipos de probetas a ensayarse.....	32
<b>Tabla 9</b> Matriz de investigaciones anteriores .....	34
<b>Tabla 10</b> Criterios de decisión y su ponderación (Método AHP).....	35
<b>Tabla 11</b> Alternativas con los valores de cada criterio (Método AHP) .....	36
<b>Tabla 12</b> Mejores alternativas obtenidas del método AHP .....	36
<b>Tabla 13</b> Cenizas de ganado vacuno dependiendo su tiempo y temperatura de calcinación .....	37
<b>Tabla 14</b> Registro de pesos antes y después de la incineración .....	37
<b>Tabla 15</b> Densidad de los diferentes tipos de ceniza analizada.....	38
<b>Tabla 16</b> Resultados del análisis granulométrico Ceniza 450°C a 2 horas .....	38
<b>Tabla 17</b> Resultados del análisis granulométrico Ceniza 450°C a 3 horas .....	39
<b>Tabla 18</b> Resultados del análisis granulométrico Ceniza 600°C a 2 horas .....	40
<b>Tabla 19</b> Resultados del análisis granulométrico Ceniza 600°C a 3 horas .....	41
<b>Tabla 20</b> Ensayo de granulometría del agregado fino.....	43
<b>Tabla 21</b> Cantidad de ceniza en reemplazo parcial del cemento .....	44
<b>Tabla 22</b> Resultado de fluidez en mortero.....	45
<b>Tabla 23</b> Resultados de compresión a 28 días .....	46
<b>Tabla 24</b> Resultados de flexión.....	51
<b>Tabla 25</b> Densidad promedio de probetas ensayadas a flexión .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esqueleto de bovino.....	23
<b>Figura 2</b> Diagrama de flujo de la metodología.....	24
<b>Figura 3</b> Muestra de 4 huesos fémur de ganado vacuno.....	26
<b>Figura 4</b> Proceso de eliminación de material orgánico de los huesos .....	26
<b>Figura 5</b> Horno empleado para la calcinación de huesos de ganado vacuno .....	27
<b>Figura 6</b> Proceso de trituración y tamizado de las cenizas.....	28
<b>Figura 7</b> Curva granulométrica Ceniza 450 °C a 2 horas .....	39
<b>Figura 8</b> Curva granulométrica Ceniza 450 °C a 3 horas .....	40
<b>Figura 9</b> Curva granulométrica Ceniza 600 °C a 2 horas .....	41
<b>Figura 10</b> Curva granulométrica Ceniza 600 °C a 3 horas.....	42
<b>Figura 11</b> Curva granulométrica agregado fino.....	44
<b>Figura 12</b> Probetas de mortero curadas previo al ensayo de compresión y flexión .....	46
<b>Figura 13</b> Resistencia a la Compresión a 7, 14 y 28 días.....	47
<b>Figura 14</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 450°C por 2 horas .....	47
<b>Figura 15</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 450°C por 2 horas .....	48
<b>Figura 16</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 450°C por 3 horas .....	48
<b>Figura 17</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 450°C por 3 horas .....	49
<b>Figura 18</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 600°C por 2 horas .....	49
<b>Figura 19</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 600°C por 2 horas .....	50
<b>Figura 20</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 600°C por 3 horas .....	50
<b>Figura 21</b> Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 600°C por 3 horas .....	51
<b>Figura 22</b> Variación de la resistencia promedio a flexión en los tipos de mortero .....	52

## RESUMEN

La industria cementera y de ganado vacuno son responsables de casi el 17% de emisiones totales de CO<sub>2</sub> registradas hasta 2023, por lo que es importante reducir el impacto ambiental mientras se gestionan los residuos, por ello la presente investigación propone analizar la influencia de la inclusión de cenizas de huesos de ganado vacuno como reemplazo parcial del material cementante evaluando el comportamiento mecánico de morteros. La metodología tiene un enfoque cuantitativo con un diseño tipo experimental, donde se recolectaron huesos femorales bovinos, posteriormente un proceso de limpieza, calcinación a 450°C y 600°C por 2 y 3 horas, trituración y tamizado por la malla No. 200, se realizó una sustitución de 5% y 10% por el peso del material cementante. La relación agua/cemento de la mezcla fue ajustada para cumplir con los rangos de fluidez (110±5) que establece la normativa NTE INEN 488, la misma fue tomada como base en la elaboración de probetas cúbicas (50x50x50)mm para compresión, así mismo la norma ASTM C348 dio los parámetros para la realización de probetas prismáticas (40x40x160)mm para flexión. El comportamiento mecánico fue analizado a los 7,14 y 28 días de curado. Los resultados muestran un incremento en la cantidad de agua cuando se tiene como reemplazo cenizas calcinadas a 450°C, y una reducción con aquellas a 600°C. La dosificación óptima correspondió a la mezcla con un reemplazo de 10% con ceniza calcinada a 600°C por 2 horas, alcanzando una resistencia de 21.83 MPa a los 28 días, representando una reducción de 1.76% frente a los 22.22 MPa arrojados por la muestra patrón, la resistencia a la flexión por el contrario tiene una reducción más alta de 14.65%. Concluyendo que con una calcinación a 600°C la ceniza de hueso de ganado vacuno tiene propiedades físicas que le permiten actuar como reemplazo parcial de material cementante, por lo que puede ser una alternativa sostenible para la elaboración de morteros estructurales.

**Palabras claves:** Mortero, cenizas de huesos, calcinación, resistencia a la compresión, reemplazo.

## ABSTRACT

The cement and cattle industries account for nearly 17% of total CO<sub>2</sub> emissions recorded up to 2023; therefore, reducing environmental impact while managing waste is essential. In this context, this research analyzes the influence of incorporating cattle bone ash as a partial replacement for cementitious material by evaluating the mechanical behavior of mortars. The methodology followed a quantitative approach with an experimental–explanatory design. Bovine femoral bones were collected and subjected to cleaning, calcination at 450°C and 600°C for 2 and 3 hours, crushing, and sieving through a No. 200 mesh. Partial replacement levels of 5% and 10% by weight of the cementitious material were evaluated. The water-to-cement ratio was adjusted to comply with the flow range ( $110 \pm 5$ ) established by the NTE INEN 488 standard, which served as the basis for preparing cubic specimens ( $50 \times 50 \times 50$  mm) for compressive strength testing. Likewise, ASTM C348 provided the specifications for producing prismatic specimens ( $40 \times 40 \times 160$  mm) for flexural strength testing. Mechanical behavior was evaluated at 7, 14, and 28 days of curing. The results indicate an increase in water demand when ashes calcined at 450°C were used as replacement material, whereas a reduction was observed with ashes calcined at 600°C. The optimal mixture corresponded to a 10% replacement with ash calcined at 600°C for 2 hours, achieving a compressive strength of 21.83 MPa at 28 days, which represents a reduction of 1.76% compared to the control sample value of 22.22 MPa. In contrast, flexural strength exhibited a greater reduction of 14.65%. It is concluded that cattle bone ash calcined at 600°C possesses physical properties that enable its use as a partial replacement for cementitious material, representing a sustainable alternative for the production of structural mortars.

**Keywords:** Mortar, bone ash, calcination, compressive strength, replacement.



Reviewed by:  
MsC. Edison Damian Escudero  
**ENGLISH PROFESSOR**  
C.C.0601890593

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Antecedentes

La Ingeniería Civil, por su amplio campo de aplicación ofrece múltiples oportunidades para incorporar criterios de construcción sostenible orientados a reducir el impacto sobre el medio ambiente sin afectar la calidad ni la funcionalidad de los proyectos [1]. Según estudios sobre las emisiones de carbono realizados hasta 2023, en el mundo la industria cementera representa alrededor de 7 a 8% del total, proyectándose un aumento de hasta 50% para 2050 [2], mientras que la producción de ganado vacuno y de leche representa entre 8% y 9% del total [3], por lo que en conjunto son responsables de casi el 17% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, bajo este contexto, la búsqueda de nuevos materiales que permitan orientar hacia modelos de construcción de menor impacto ambiental ha resultado de gran interés para la comunidad científica y la industria de la construcción.

Varios estudios se han enfocado en la búsqueda de alternativas al cemento, ya sea residuos de carácter industrial o agrícola de preferencia desechables, materiales puzolánicos que cumplan el requisito de ser subproductos de fuentes ricas en aluminio y silicio, entre algunos ejemplos de residuos industriales se tienen las cenizas volantes, escoria y humo de sílice [4], otros menos utilizados y de origen orgánico son: ceniza de cáscara de arroz, ceniza de bagazo de caña de azúcar, ceniza de combustión de biomasa y vidrio molido [5]. También se ha indagado sobre la posibilidad de implementar cenizas de animales como sustituto del cemento en producción de concreto, ya que se descubrió que la ceniza de huesos posee mayor puzolanidad en comparación a otras cenizas agrícolas como la madera, pudiéndose usar como relleno económico ya que los huesos de animales son un desperdicio común hoy en día [6].

Con análisis de rayos X se evidencia que las cenizas de huesos presentan una estructura perteneciente a la hidroxiapatita, mineral rico en Calcio y Fósforo que está presente en el esmalte de huesos y dientes, siendo el encargado de dar dureza, capacidad y estructura [7], el cemento Portland se forma a base de óxido de calcio, conteniendo entre 62% y 68% de este [8], ambos elementos presentan la característica de poseer gran cantidad de calcio, por lo que la inclusión de cenizas de huesos provenientes del ganado vacuno ha sido identificada como una opción de un material con características fisicoquímicas favorables para la aplicación en morteros [9].

Para su utilización el hueso debe contar con un tratamiento de limpieza previo a la calcinación para eliminar componentes orgánicos, una vez limpio su uso dentro de la mezcla de concreto es posible ya sea como agregado grueso, fino o parte del material cementante puesto que el tejido óseo cuenta con propiedades físicas y químicas similares a varios componentes del concreto [9]. Por lo tanto, la implementación de este tipo de material requiere de una investigación a profundidad para analizar el comportamiento de morteros elaborados a partir de la sustitución parcial del cemento por ceniza proveniente de huesos calcinados de ganado vacuno.

## 1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, la construcción busca la implementación de materiales sostenibles a través de residuos tanto en la construcción como agroindustriales, debido a que reducen el impacto ambiental y pueden generar una reducción de costos [10].

Ecuador, país con una significativa producción ganadera, genera grandes cantidades de residuos óseos que no tienen un uso industrial óptimo. Bravo [11] afirma “la disposición de residuos ganaderos suele tener impactos negativos en el medio ambiente, lo que subraya la necesidad de encontrar aplicaciones útiles para estos desechos”.

La integración de cenizas de tejido óseo como reemplazo parcial del cemento en concreto tiene el potencial de mejorar ciertas propiedades mecánicas del material. Según Samacá [9] en su investigación sobre el uso de tejido óseo en el concreto, la mezcla de cemento con reemplazo de 10% de cenizas de huesos calcinadas por 1 hora a 1200 °C requiere un 3,08% menos de agua que la pasta de cemento convencional y muestra una reducción del tiempo de fraguado de hasta 45 minutos. No obstante, su estudio se centra en analizar el comportamiento del concreto, lo que genera incertidumbre sobre la influencia de las cenizas de ganado vacuno en morteros. Por ello, es necesario realizar investigaciones exhaustivas para determinar las proporciones óptimas y las condiciones bajo las cuales estos materiales reciclados pueden incorporarse sin comprometer la calidad del mortero.

## 1.3 Justificación

El mortero es una mezcla de pasta y agregado fino como lo es la arena, esta mezcla es usada para unir ladrillos de mampostería e incluso en el recubrimiento en ciertos casos [12]. Esto lo convierte en uno de los elementos más usados en el campo de la construcción, y la demanda aumenta gradualmente con el incremento de la población a nivel mundial. Debido a esto, el uso del mortero convencional puede resultar costoso y difícil de controlar y predecir. El concreto, mortero y subproductos del cemento son susceptibles a cualquier ajuste o cambio para su optimización [12]. Bajo este criterio, la búsqueda de innovación en el mortero se convierte en una posibilidad que podría arrojar mejores resultados en las propiedades mecánicas del mortero convencional.

El comportamiento biomecánico de los huesos presenta una alta resistencia debido a la función que tienen estos en el cuerpo, adaptados para resistir compresión y tensión, lo cual lo ubica como un posible elemento favorable para realizar la muestra [9].

Según varias investigaciones como la que efectuó Izquierdo [13] se puede realizar una sustitución parcial del cemento Portland por polvo residual de residuos orgánicos, ya sea de origen vegetal o animal, como lo son: carne, vegetales, frutas, cáscara de huevo, papel, madera, semillas y huesos. En Ecuador, si bien la investigación en la industria cementera sobre la implementación de elementos reciclables avanza, aún hace falta profundizar más en nuevas alternativas sustentables para la creación de mezclas como el hormigón y mortero en la industria de la construcción.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Analizar la influencia de la inclusión de las cenizas de los huesos de ganado vacuno en el comportamiento mecánico de morteros.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar los huesos carbonizados como reemplazo parcial del material cementante.
- Determinar la dosificación óptima considerando las propiedades mecánicas del mortero.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Estado del Arte

Los materiales de construcción que hacen uso de cemento como el hormigón y mortero tienen un gran impacto ambiental, en especial en la generación del clinker necesario para elaborar el cemento, produciendo alrededor de 600 a 800 kg de CO<sub>2</sub> para generar 1000 kg de este componente, siendo este de 7% a 8% de las emisiones totales de este gas a la atmósfera [14]. Según Onsongo [15] El interés por prácticas de economía circular ha aumentado con el paso del tiempo, y la industria de la construcción no es la excepción, habiendo un incremento del número de publicaciones sobre la eficiencia de los recursos. Con el paso del tiempo, los fabricantes de cemento han ido reemplazando progresivamente las materias primas, como la piedra caliza, por subproductos como la escoria, la ceniza y el humo de sílice.

Se debe enfatizar en la reducción de emisiones de gas invernadero, actualmente la cantidad de residuos agrícolas y de ganadería han aumentado, con lo que su gestión también debe ser proporcional, una de las alternativas es su implementación en la producción de hormigón, pudiendo usarse como sustitutos del cemento [16]. Guzmán [17] concuerda en que el uso de residuos industriales como alternativas tiene un gran potencial para brindar soluciones ante las altas emisiones de CO<sub>2</sub> y la utilización de energía que se presentan en el mundo actualmente; se refuerza principalmente con el hecho de que el hueso pulverizado actúa como una sustancia puzolánica que reacciona con hidróxido de calcio. Debido a que, a nivel microestructural el hueso al calcinarse se compone mayoritariamente de hidroxiapatita, compuesto con abundancia de elementos químicos como el calcio [7], esta similitud facilita la formación de fases estables durante la hidratación.

Diversos autores señalan el tiempo de calcinación de los materiales empleados en sus ensayos; Vaca [18] considera 1 hora a 600, 900 y 1200 °C, con enfriamiento dentro del horno. Konitufe [19] también calcina durante 1 hora a 600 y 800 °C con un enfriamiento dentro del horno. En su lugar, Awoyemi [20] considera 3 horas a 800 °C con un enfriamiento dentro del horno por 24 horas. Por el contrario, Varma [21] realiza una calcinación sin tiempo ni enfriamiento controlado a 900 °C. Abdulwahab [22] tampoco controla el tiempo ni el enfriamiento, pero sí ajusta la temperatura a 900 °C. En todas las calcinaciones, se sigue un proceso de limpieza y secado al sol durante al menos 1 día. Los autores afirman que la mejor opción es un reemplazo de 10% de ceniza por material cementante, a excepción de Abdulwahab [22] que propone un reemplazo de 5%.

Entre todos los estudios se llegó a la conclusión de que esta práctica contribuye a reducir el impacto ambiental, además de que la ceniza de huesos posee componentes químicos muy similares al cemento [21], y que el incluirla puede servir como relleno de los poros del hormigón lo que mejora la densidad y absorción de agua, incluso puede llegar a aumentar la trabajabilidad [23]. La variabilidad en procesos de calcinación presentados por la literatura muestra una discrepancia entre las cenizas obtenidas por los autores

mencionados, en algunos casos llegando a ser considerable su efecto en la resistencia final, siendo algo importante y a tomar en cuenta para la validación de resultados.

## 2.2 Marco Teórico

### 2.2.1 Evolución de resistencia del cemento

El cemento al ser hidratado en las primeras 48 a 72 horas genera reacciones químicas de carácter exotérmico donde se producen compuestos como hidróxido de calcio y gel de silicato de calcio hidratado, siendo este el aglutinante que entra en los poros y se expande, así juntando todos los agregados, reduciendo la porosidad y aumentando la resistencia, sin embargo esta es la reacción inicial, después de esto las reacciones se ralentizan debido a que los productos antes mencionados forman una capa densa en los granos de cemento sin reaccionar, por lo que el agua restante tarda en llegar al núcleo de los mismos, la evolución de la resistencia se muestra en la Tabla 1, llegando a su refinamiento microestructural máximo a los 28 días [24].

**Tabla 1**

*Fases de la resistencia del cemento*

Edad del concreto	Porcentaje Aproximado de resistencia	Estado Microestructural de	Importancia en la construcción
1 día	10-15%	Porosidad alta	Suficiente para manipularse, estructuralmente inadecuado
3 días	30-40%	Acelerado en la capa de hidratación	Adecuado para retirar en encofrados ligeros
7 días	65-70%	Aumento de la resistencia y reducción de poros	Evaluación preliminar de control de calidad
28 días	99-100% (Valor de referencia)	Reducción significativa de poros y aumento de resistencia	Resistencia referencial obligatoria

*Nota.* Fuente: [24]

### 2.2.2 Materiales cementantes suplementarios

Se pueden implementar materiales alternativos como sustitución del cemento, varias publicaciones demuestran un excelente funcionamiento de materiales como ceniza de cáscara de arroz o ceniza volante, los cuales comparten la característica de ser ricos en sílice, otras condiciones para ser materiales suplementarios es que estos mismos deben presentar un comportamiento puzolánico y actuar como material de relleno, lo cual en algunos casos puede mejorar la hidratación, microestructura y reducir la porosidad [25].

### **2.2.3 Puzolanicidad**

Es aquel atributo que presentan algunos materiales con baja cristalinidad y alto contenido de SiO<sub>2</sub> (sílice) además de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alúmina), los cuales tienen la capacidad de reaccionar con la portlandita conocida también como cal, elemento presente en el cemento Portland, así generando uniones lábiles y actuando como aglomerante [26].

### **2.2.4 Calcinación de material orgánico**

Los materiales orgánicos son muy distintos a materias de origen fósil ya que las primeras mantienen mayor contenido de humedad, oxígeno y reactividad, valores más bajos de carbono y fusión. A valores más bajos como 200 °C se producen radicales de oxígeno encargados de la descomposición del material orgánico, pero no los inorgánicos, se forman minerales como basanita o nitratos, con temperaturas de 550 °C se generan otros minerales como carbonatos, silicatos, fosfatos, óxidos simples, los que ya se encontraban empiezan a cristalizar, a temperaturas de 815 °C los minerales ya mencionados cristalizan [27].

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1 Materiales Aglutinantes**

Son aquellos materiales finos pulverizados que tienen la capacidad de unir o pegar otros áridos, fibras y partículas entre sí, en el caso del cemento se pueden incrustar diversos materiales como fragmentos de áridos ya sean gruesos o finos, además de otras partículas, el cemento hidráulico genera una reacción con el agua para activar su reacción aglutinante [28].

### **2.3.2 Mortero**

De forma general, es la mezcla de agregados, cemento y agua. Dicha mezcla puede o no tener una función estructural. Existen varios tipos de mortero, destacando aquellos con alta resistencia ofreciendo mayor durabilidad para estructuras que tienen contacto con el suelo [29].

### **2.3.3 Material cementante**

El cemento Portland se forma tras la pulverización de materias primas ricas en sílice como arcilla y caliza posteriormente realizándose una cocción a 1450 °C [30]. Este material ha sido de los aglomerantes con mayor uso desde su invención, siendo después del agua el material que más consumo tiene en el planeta [31].

El cemento se utiliza para formar hormigón hidráulico, el material más empleado actualmente para construcción gracias a su bajo costo, rendimiento, durabilidad y versatilidad [14].

### 2.3.4 Dosificación

La dosificación en morteros suele medirse en relaciones, por ejemplo 1:3, 1:4, 1:n que indica la relación cemento: arena existente [29], a esta mezcla se añade agua para generar la correspondiente reacción de los elementos; esto se conoce como relación agua/cemento. Se debe tener un buen control de esta ya que una cantidad elevada de agua provoca agrietamientos en el mortero debido a las retracciones generadas [32]. Existen muchas normas que dictan varias dosificaciones para resistencias específicas; en este caso, se tomó como guía la norma NTE INEN 488:2009.

### 2.3.5 Agregados

El agregado utilizado en el mortero es el llamado agregado fino, conocido coloquialmente como arena. Según la norma ASTM C-33, el agregado fino es todo aquel que tiene un módulo de finura entre 2.3 y 3.1, además de presentar una granulometría dentro de los límites mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Límites de tamizado para agregado fino*

<b>Tamiz (Especificación E 11)</b>	<b>Porcentaje Pasando (%)</b>
<b>9.5 mm (3/8 in)</b>	100
<b>4.75 mm (No. 4)</b>	95 a 100
<b>2.36 mm (No. 8)</b>	80 a 100
<b>1.18 mm (No.16)</b>	50 a 85
<b>600 <math>\mu</math>m (No. 30)</b>	25 a 60
<b>300 <math>\mu</math>m (No. 50)</b>	5 a 30
<b>150 <math>\mu</math>m (No. 100)</b>	0 a 10

*Nota.* Fuente: [33]

### 2.3.6 Material óseo

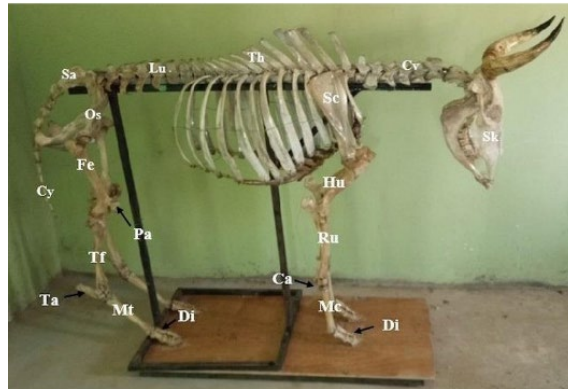
El tejido óseo es un material adaptable, óptimo y duro; además, mantiene propiedades físicas y químicas similares a las de los agregados empleados en el concreto. El hueso calcinado puede ser un material óptimo para sustitución parcial en las mezclas de hormigón, pudiendo generarse sobre todo un reemplazo de la parte del material cementante [9].

### 2.3.7 Tipos de osamentas

El ganado vacuno tiene una serie de huesos en su esqueleto que se ve estructurado de la siguiente forma:

## Figura 1

### *Esqueleto de bovino*



*Nota.* Fuente: [34]

Donde se aprecian los huesos de la vaca siendo 207 que ayudan a la protección de los órganos del ser vivo, entre los cuales se tienen los siguientes: Fémur (Fe), Tibia o peroné (Tf), Rótula (Pa), Metatarso (Mt), Digital (Di), Extremidad escapular (Sc), Dedos (Di), Húmero (Hu), radio o cúbito (Ru), Carpo (Ca), Metacarpo (Mc), cráneo (Sk), Vértebras cervicales (Cv), Vértebras torácicas (Th), Vértebras lumbares (Lu), Vértebras sacras (Sa), Vértebras coccígeas (Cy), Costillas (Rb), Esternón (St) [34].

### **2.3.8 Fémur**

El fémur es el hueso más ancho, largo y pesado en la mayoría de los animales; por ello, exhibe una mayor resistencia y durabilidad que otros huesos del sistema óseo. Gracias a estas propiedades mecánicas es usado en pruebas de resistencia a fracturas, donde se evalúa resistencia a compresión y tensión [35].

## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

### 3.1 Tipo de Investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo, de tipo experimental-explicativo, debido a que se busca analizar la influencia del uso de cenizas de ganado vacuno como reemplazo parcial del cemento Portland en morteros, mediante ensayos normalizados que permitan evaluar las propiedades mecánicas y físicas del material.

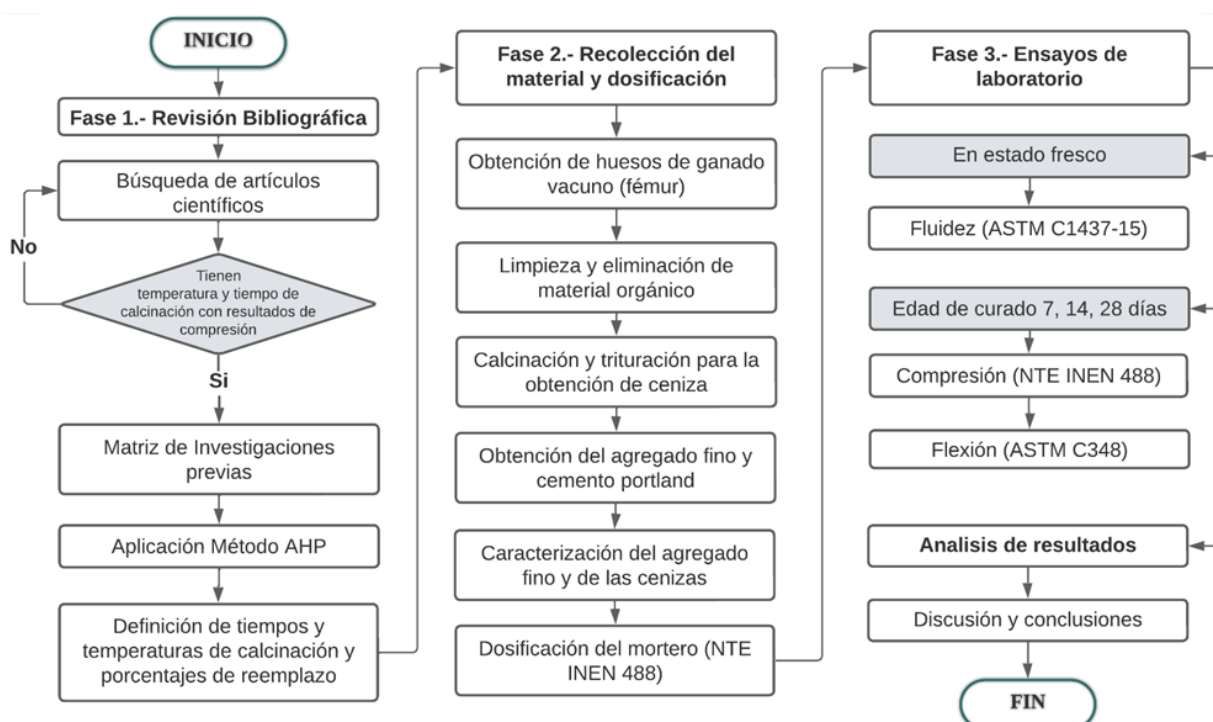
El carácter experimental se centra en la variación del porcentaje de reemplazo del cemento por ceniza de huesos de ganado vacuno, obtenida con diferentes tiempos y temperaturas de calcinación, para comparar las resistencias a la compresión y a la flexión con un mortero convencional.

El alcance explicativo se demuestra con los resultados de los ensayos; se pretende establecer relaciones de causa-efecto, incluida la incidencia del reemplazo de la ceniza de huesos en el comportamiento mecánico del mortero.

El enfoque es cuantitativo principalmente debido a la obtención de datos numéricos equivalentes a los resultados de ensayos de laboratorio, que se analizarán mediante valores promedio, curvas y gráficos que faciliten su interpretación.

**Figura 2**

*Diagrama de flujo de la metodología*



## 3.2 Diseño de Investigación

### 3.2.1 Fase 1: Revisión Bibliográfica

En esta fase se realizó una revisión bibliográfica organizada a través de una matriz con investigaciones nacionales e internacionales consultadas en bases de datos como ResearchGate, Springer Nature Link, ScienceDirect, revistas científicas publicadas por MDPI y en repositorios institucionales de universidades de varios países, donde se realizó búsquedas relacionadas con la utilización de cenizas de origen óseo de ganado vacuno como un reemplazo parcial del material cementante en la elaboración de morteros o concretos, para conocer los resultados de investigaciones anteriores.

Como parte de la revisión bibliográfica, se aplicó el método AHP (Analytic Hierarchy Process), un proceso analítico jerárquico que permite definir técnicamente la temperatura y el tiempo de calcinación para la obtención de las cenizas, así como el porcentaje de reemplazo del material cementante que se empleará en esta investigación.

El método AHP permite resolver de manera ordenada y justificada qué tan adecuada es una alternativa bajo los criterios propuestos [36]. Los pasos a seguir son:

1. Establecer una meta u objetivo.
2. Identificar las alternativas de decisión.
3. Elegir los criterios de decisión (las características de cada alternativa que se evalúan con respecto a la meta).
4. Ponderar los criterios según su importancia relativa (con respecto a otro elemento del modelo multicriterio, según la Tabla 3).
5. Evaluar y ponderar las alternativas según los criterios, en función de la importancia relativa definida anteriormente.
6. Determinar la o las mejores alternativas en relación con el objetivo y las limitaciones consideradas.

**Tabla 3**

*Escala fundamental de comparación por pares (Método AHP)*

Valor	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	Criterio A igual que el B
3	Importancia moderada	Criterio A ligeramente superior al B
5	Importancia grande	Criterio A fuertemente superior al B
7	Importancia muy grande	Criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	Criterio A mayor que B fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores	

*Nota.* Fuente: [36]

### 3.2.2 Fase 2: Recolección del material y dosificación

#### 3.2.2.1 Cenizas de huesos de ganado vacuno

##### 3.2.2.1.1 Obtención de los huesos de ganado vacuno

Los huesos de ganado vacuno utilizados en la investigación fueron recolectados en el mercado del sector de la “Condamine” en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo, y cumplen con los protocolos y han sido revisados en el camal municipal. Se adquirieron 12 huesos de fémur en total, ya que el fémur es el hueso más ancho, largo y pesado de los bovinos.

#### Figura 3

*Muestra de 4 huesos fémur de ganado vacuno*



##### 3.2.2.1.2 Limpieza y eliminación de material orgánico

Inicialmente, los huesos se dejaron en remojo, con el fin de ablandar los tejidos y demás material orgánico adheridos a ellos. Posteriormente, se realizó un lavado de todos los huesos para iniciar la eliminación manual de tejidos blandos y grasas con bisturís, hasta dejarlos lo más limpios posible. Finalmente, los huesos fueron secados al sol. Este proceso puede observarse en la Figura 4.

#### Figura 4

*Proceso de eliminación de material orgánico de los huesos*



### 3.2.2.1.3 Calcinación

En el proceso de calcinación de los huesos se emplea un horno que opera a base de combustible (diésel), en el que la temperatura se controla de forma gradual. Se colocan 3 huesos en el interior por cada tipo de ceniza que se desea obtener (véase Anexo 1) y se enciende el horno hasta alcanzar la temperatura de calcinación establecida, permitiendo que el horno se eleve ligeramente. Posteriormente el horno se apaga y se espera a que la temperatura descendiera parcialmente, este proceso se repitió para cada tipo de muestra.

Una vez finalizado el tiempo de calcinación, los huesos se dejaron en reposo dentro del horno durante aproximadamente una hora, permitiendo un enfriamiento suficiente para un retiro seguro; no obstante, se deben tomar todas las medidas y el equipo de protección necesarios.

### Figura 5

*Horno empleado para la calcinación de huesos de ganado vacuno*



### 3.2.2.1.4 Trituración y tamizado

Cuando los huesos calcinados alcanzaron la temperatura ambiente, se procedió a su trituración inicial mediante golpes con martillos para reducir su tamaño a fragmentos más pequeños. Posteriormente, el material obtenido fue procesado en un molino manual, repitiendo la molienda tantas veces como fuera necesario hasta obtener una granulometría más fina y homogénea.

Finalmente, la ceniza resultante fue tamizada, para seleccionar únicamente el material que pasa el tamiz N.º 200, el cual fue utilizado como reemplazo parcial del material cementante en la elaboración de las mezclas de mortero

## Figura 6

*Proceso de trituración y tamizado de las cenizas*



### 3.2.2.1.5 Caracterización de las cenizas

Para conocer las propiedades físicas de la ceniza de huesos calcinados de ganado vacuno, se realizaron los siguientes ensayos detallados en la Tabla 4:

**Tabla 4**

*Ensayos realizados para la caracterización física de las cenizas*

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
<b>Análisis granulométrico</b>	NTE INEN 696	Determinar la distribución del tamaño de partículas del material a partir del porcentaje que retiene y el que pasa en una serie de tamices con diferentes aberturas.
<b>Densidad</b>	NTE INEN 857	Determinar la densidad y la densidad relativa del material, relacionando su masa y su volumen mediante el uso del picnómetro.

### 3.2.2.2 Agregado Fino

#### 3.2.2.2.1 Obtención del agregado fino

El árido fino seleccionado para la elaboración del mortero fue obtenido del río de Penipe (véase la Tabla 5), seleccionándose en función de su disponibilidad y por sus características adecuadas, ya que, en investigaciones previas, se constataron sus características físicas y químicas asegurando que cumple los requisitos para ser considerado árido fino.

**Tabla 5***Coordenadas UTM de donde proviene el agregado fino*

<b>Coordenadas UTM Zona 17M</b>	
<b>Norte</b>	9828333.78 m S
<b>Este</b>	773741.72 m E

**3.2.2.2.2 Caracterización del agregado fino**

La caracterización del agregado fino se realizó previa a la elaboración del mortero, con el propósito de verificar que el material cumpliera con los requisitos establecidos en la norma NTE INEN 872.

Análisis granulométrico: el árido fino debe ser graduado dentro de los límites (detallados en la Tabla 2) y su módulo de finura no debe ser menor que 2.3 ni mayor que 3.1.

**3.2.2.3 Cemento**

Para la elaboración de las mezclas de mortero se utilizó como material cementante el cemento Portland Tipo GU, debido a su disponibilidad y a su cumplimiento con lo establecido en la Norma NTE INEN 2380. Previamente a su uso, se verificó que el cemento almacenado se encontraba en condiciones adecuadas para evitar alteraciones en el desarrollo de la investigación.

A continuación, se presenta la densidad del cemento tipo GU, determinada en una investigación (Tabla 6), como dato para compararla con los valores de densidad de las cenizas de ganado vacuno que hemos obtenido.

**Tabla 6***Densidad del cemento tipo GU*

<b>Densidad del cemento</b>	
<b>Masa [g]</b>	60
<b>Volumen inicial [cm3]</b>	0
<b>Volumen final [cm3]</b>	20.5
<b>V=Vf-Vi</b>	20.5
<b>Densidad [g/cm3]</b>	2.93

*Nota.* Fuente: [18]

### 3.2.2.4 Dosificación

La dosificación del mortero se estableció con lo dispuesto en la norma NTE INEN 488, donde se detalla la cantidad en gramos que se debe emplear de cada material presente en la mezcla (Tabla 7), de esta manera, se definió la dosificación para la muestra patrón.

**Tabla 7**

*Cantidad de materiales para elaborar seis y nueve especímenes de mortero*

MATERIAL	NÚMERO DE ESPECÍMENES	
	6	9
Cemento, g	500	740
Arena, g	1375	2035
Agua, cm <sup>3</sup>	242	359
- Portland (a/c = 0.485)	230	340
- Portland con incorporador de aire (a/c = 0.460)	-----	-----
- Otros (para un flujo de 110 ±5)		

*Nota.* Fuente: [37]

A partir de la dosificación base, se realizaron las variaciones mediante la sustitución parcial del cemento por ceniza de hueso de ganado vacuno en los porcentajes definidos en la investigación, la relación agua-cemento se consideró la misma de la norma, sin embargo, al realizar el ensayo de fluidez se tendrá la dosificación final donde se corregirá la relación agua cemento si es necesario, con el fin de asegurar la trabajabilidad de la mezcla de mortero.

### 3.2.3 Fase 3: Ensayos de laboratorio

Con el propósito de evaluar el comportamiento del mortero en estado fresco y endurecido, se realizaron ensayos de laboratorio en cada mezcla, con diferentes variaciones en el tiempo, la temperatura de calcinación y el porcentaje de reemplazo parcial del cemento.

#### 3.2.3.1 Fluidez del mortero

Norma utilizada: ASTM C1437-15

El ensayo de fluidez se realizó con el fin de determinar la trabajabilidad del mortero en estado fresco mediante la mesa de flujo, en la que la mezcla se coloca en un molde cónico que se retira posteriormente para permitir la expansión del mortero al someterlo a una serie de golpes estandarizados en la mesa. El diámetro final de expansión permite calcular la fluidez, valor que se utilizó para ajustar la relación agua-cemento y mantenerla dentro de los límites propuestos por la norma NTE INEN 488:2009.

### **3.2.3.2 Resistencia a la compresión**

Norma utilizada: NTE INEN 488:2009

El ensayo de resistencia a la compresión se efectuó en probetas de mortero de 50x50x50 mm, previamente curadas para los ensayos (7, 14 y 28 días), en las que las muestras fueron sometidas a una carga axial creciente en una prensa de compresión hasta la aparición de la falla. El valor de la resistencia se determina dividiendo la carga máxima aplicada entre el área transversal de la probeta.

### **3.2.3.3 Resistencia a la flexión**

Norma utilizada: ASTM C348

El ensayo de resistencia a la flexión se realizó en probetas prismáticas de mortero de 40x40x160 mm en periodos de curado de 7, 14 y 28 días. De acuerdo con la norma ASTM C348, las probetas se colocan sobre dos apoyos en la máquina de ensayo y se someten a una carga aplicada en el centro de la muestra, que aumenta progresivamente hasta provocar la falla.

El valor de la resistencia a la flexión se determina a partir de la carga máxima registrada en el momento de la rotura, considerando las dimensiones de la probeta y la distancia entre los apoyos.

## **3.3 Técnicas de recolección de datos**

La recolección de datos en la investigación se realizó mediante el análisis multicriterio de fuentes bibliográficas y durante el desarrollo experimental. En primer lugar, se recopilaron los datos derivados de la matriz de priorización resultante del método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que permitió categorizar las alternativas de estudio según criterios definidos con el propósito de seleccionar los parámetros de las dosificaciones a evaluar.

Finalmente, se recolectaron los datos correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión del mortero, obtenidos a partir de probetas cúbicas y prismáticas ensayadas en laboratorio a las edades de curado establecidas. Estos resultados constituyen la principal fuente de información cuantitativa de la investigación, lo que permite evaluar el comportamiento mecánico del material y comparar el desempeño de las diferentes dosificaciones.

### 3.4 Población de estudio y tamaño de muestra

#### 3.4.1. Población

La población de estudio está conformada por las probetas de mortero elaboradas para evaluar el efecto del reemplazo parcial del cemento por ceniza de ganado vacuno, que incluye probetas cúbicas para ensayos de resistencia a la compresión y probetas prismáticas para ensayos de resistencia a la flexión.

#### 3.4.2. Muestra

La muestra de la investigación corresponde a la totalidad de las probetas elaboradas bajo condiciones controladas, donde se tomaron en cuenta 3 cubos de mortero de 50x50x50 mm por cada edad de curado (7, 14 y 28 días) para cada tipo de ceniza, como se muestra en la Tabla 8, así como también se elaboraron muestras patrón para poder comparar los resultados entre sí.

Para conocer cómo se comporta el mortero a flexión, se realizaron 3 prismas de 40x40x160 mm para cada edad de curado de 7, 14 y 28 días para la muestra patrón y para la muestra con mejor resistencia a la compresión obtenida (ver Tabla 8).

**Tabla 8**

*Tipos de probetas a ensayarse*

TIPOS DE PROBETAS	CONTENIDO
1	5% de ceniza 450°C 2 horas
2	10% de ceniza 450°C 2 horas
3	5% de ceniza 450°C 3 horas
4	10% de ceniza 450°C 3 horas
5	5% de ceniza 600°C 2 horas
6	10% de ceniza 600°C 2 horas
7	5% de ceniza 600°C 3 horas
8	10% de ceniza 600°C 3 horas
9	muestra patrón

Se tienen 9 cubos por cada tipo de probeta, lo que da un total de 81 cubos de mortero y 18 prismas para evaluarlas a flexión (9 de la muestra patrón y 9 de la muestra con la mejor resistencia a compresión).

### 3.5 Métodos de análisis y procesamiento de datos

Para el desarrollo de la investigación, los resultados experimentales de los ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión y a la flexión fueron organizados y procesados mediante tablas de Excel, lo que permitió calcular valores promedio representativos para cada dosificación analizada.

Posteriormente, los resultados se representaron mediante gráficos de barras, que facilitaron la visualización de los valores obtenidos, como las resistencias a la compresión y a la flexión, y permitieron contrastar la influencia de las cenizas en las probetas con un porcentaje de reemplazo parcial del cemento respecto del mortero de control.

Con el propósito de encontrar la dosificación óptima, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman, debido a que permite evaluar la relación entre variables sin asumir una distribución normal de los datos, para esta investigación se busca encontrar el grado de asociación entre los porcentajes de reemplazo de cemento por ceniza de hueso de ganado vacuno, la temperatura y tiempo de calcinación con los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1 Análisis de resultados

#### 4.1.1 Fase 1: Método AHP

Como resultado de la revisión bibliográfica, se presenta la siguiente matriz de investigaciones anteriores, en la que se detallan las temperaturas y los tiempos de calcinación empleados, el porcentaje de reemplazo del material cementante y los resultados obtenidos en los ensayos de compresión.

**Tabla 9**

*Matriz de investigaciones anteriores*

Autor(es)	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	% Reemplazo	Resultados compresión (MPa)
<b>Jhonny Stalin Vaca Pillajo [18]</b>	-	-	0%	24.35
	<b>600</b>	<b>1</b>	<b>10%</b>	<b>21.97</b>
	600	1	12.50%	17.58
	600	1	15%	18.12
	900	1	10%	20.61
	900	1	12.50%	18.53
	900	1	15%	17.53
	1200	1	10%	17.27
	1200	1	12.50%	16.19
<b>Shumet Getahun Bahiru Bewket [38]</b>	-	-	0%	41.07
	<b>900</b>	<b>3</b>	<b>5%</b>	<b>34.94</b>
	900	3	10%	27.52
	900	3	15%	22.29
<b>Elkin Ronaldo Palomino Guzmán [17]</b>	-	-	0%	22.18
	<b>450</b>	<b>30</b>	<b>10%</b>	<b>22.78</b>
	450	30	15%	18.395
<b>Rasheed Abdulwahab [22]</b>	-	-	0%	24.375
	<b>900</b>	<b>4</b>	<b>5%</b>	<b>22.71</b>
	900	4	10%	14.3
<b>Bolanle Deborah Ikotun Akeem Ayinde Raheem Ezekiel Adeyemi Adetoro</b>	900	4	20%	12.5
	900	4	20%	12.5
<b>Christian Dannyel Gil Marciales [39]</b>	-	-	0%	32.47
	<b>600</b>	<b>18</b>	<b>5%</b>	<b>33.76</b>

<b>Autor(es)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>% Reemplazo</b>	<b>Resultados compresión (MPa)</b>
	<b>600</b>	<b>18</b>	<b>10%</b>	<b>30.98</b>
	600	18	15%	29.43
	600	18	20%	22.59
<b>Felipe Pedraza [40]</b>	-	-	0%	18.24
<b>Marcela Riveira</b>	600	1	10%	13.56
<b>Erika Velásquez</b>	<b>600</b>	<b>2</b>	<b>10%</b>	<b>17.33</b>
	900	1	10%	12.4
	900	2	10%	15.57
	<b>1200</b>	<b>1</b>	<b>10%</b>	<b>19.89</b>
	1200	2	10%	12.8

*Nota.* Los valores en negrita corresponden a los mejores resultados reportados en las investigaciones.

Los criterios de decisión para el método AHP son: la resistencia a compresión con el valor más alto en la ponderación, seguido de, el porcentaje de reemplazo del material cementante, el tiempo y temperatura de calcinación, los mismos que dependiendo su importancia tuvieron la ponderación, presentada en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Criterios de decisión y su ponderación (Método AHP)*

<b>Criterios</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Reemplazo</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Resistencia</b>	1	2	5	7	<b>0.52</b>
<b>Reemplazo</b>	1/2	1	3	5	<b>0.30</b>
<b>Tiempo</b>	1/5	1/3	1	3	<b>0.12</b>
<b>Temperatura</b>	1/7	1/5	1/3	1	<b>0.06</b>

*Nota.* El valor asignado a cada criterio se impuso siguiendo la escala fundamental de comparación por pares propuesta por el autor del método.

De la matriz de investigaciones anteriores se tomaron los 6 mejores resultados como alternativas para el método AHP, como se muestra en la Tabla 11, considerados aquellos que tengan una resistencia a la compresión superior a la de la muestra patrón o una ligera diferencia respecto de esta.

**Tabla 11***Alternativas con los valores de cada criterio (Método AHP)*

<b>Alternativas</b>	<b>Resistencia* (MPa)</b>	<b>Reemplazo (%)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>Alternativa 1</b>	1.65	10	1	1200
<b>Alternativa 2</b>	1.29	5	18	600
<b>Alternativa 3</b>	0.6	10	30	450
<b>Alternativa 4</b>	-0.91	10	2	600
<b>Alternativa 5</b>	-1.49	10	18	600
<b>Alternativa 6</b>	-1.67	5	4	900

*Nota.* \*Los valores de resistencias fueron obtenidos al sacar la diferencia de los resultados de compresión a los 28 días entre la muestra patrón y la muestra ensayada.

Como resultado final de la aplicación del método AHP se obtuvo las mejores 3 alternativas junto al valor de priorización, los cuales sirven para definir el tiempo y temperatura de calcinación de los huesos de ganado vacuno y el porcentaje de reemplazo parcial del cemento.

**Tabla 12***Mejores alternativas obtenidas del método AHP*

<b>Alternativas</b>	<b>% Reemplazo</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>PRIORIZACION</b>
<b>Alternativa 1</b>	10	1	1200	<b>0.33</b>
<b>Alternativa 2</b>	5	18	600	<b>0.17</b>
<b>Alternativa 3</b>	10	30	450	<b>0.17</b>

Considerando las limitaciones que se presentaron para encontrar un horno cerca de la localidad que alcance temperaturas elevadas se decidió descartar la alternativa 1, además los tiempos prolongados de calcinación generan mayores costos y dificultades operativas aunque sea con temperaturas moderadas, por lo tanto en base a la Tabla 12, se optó por trabajar con temperaturas de 450°C y 600°C, con tiempos de calcinación de 2 y 3 horas respectivamente y con porcentajes de reemplazo del material cementante de 5% y 10%.

#### **4.1.2 Fase 2: Caracterización de materiales y dosificación**





##### **4.1.2.1 Caracterización de las cenizas**

En la caracterización visual de las cenizas obtenidas tras el proceso de calcinación se observaron diferencias en la tonalidad entre las muestras analizadas, detalladas en la Tabla 13. Las tres primeras cenizas presentan una coloración más oscura, mientras que la ceniza sometida a 600 °C durante 3 horas muestra un tono más claro. Es importante recordar que el

proceso de calcinación se realizó en un horno de combustión a diésel, lo que podría influir en la coloración final de cada tipo de ceniza.

**Tabla 13**

*Cenizas de ganado vacuno dependiendo su tiempo y temperatura de calcinación*

<b>Tipo de Ceniza</b>	<b>Imagen</b>
450°C 2 horas de calcinación	
450°C 3 horas de calcinación	
600°C 2 horas de calcinación	
600°C 3 horas de calcinación	

A continuación, se presenta los pesos de los huesos antes de ser incinerados (Anexo 1) y la cantidad de ceniza resultante (Anexo 2) dando un 35-36% del peso total inicial de los huesos.

**Tabla 14**

*Registro de pesos antes y después de la incineración*

<b>Muestra</b>	<b>Peso huesos (kg)</b>			<b>TOTAL (kg)</b>	<b>Ceniza (kg)</b>	<b>% Resultante del total</b>
	1	2	3			
<b>450-2H</b>	1.65	1.40	1.00	4.05	1.43	35%
<b>450-3H</b>	1.65	1.30	1.20	4.15	1.51	36%
<b>600-2H</b>	1.70	1.35	1.25	4.30	1.52	35%
<b>600-3H</b>	1.40	1.40	1.25	4.05	1.45	36%

#### 4.1.2.1.1 Densidad de las cenizas

En la Tabla 15 se muestran las densidades obtenidas (Anexo 3) para cada tipo de ceniza, los cálculos se presentan en el Anexo 4.

**Tabla 15**

*Densidad de los diferentes tipos de ceniza analizada*

Factores	450-2H	450-3H	600-2H	600-3H
Densidad Relativa SH (g/cm <sup>3</sup> )	1.73	1.28	1.96	2.35
Densidad relativa SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2.07	1.69	2.21	2.56
Densidad Relativa Aparente SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.18	2.61	2.99
Absorción (%)	19.62	32.28	12.61	9.17

Si bien la reducción del peso de los huesos al realizarse la incineración es similar en todos los tipos de ceniza como se indica en la Tabla 14, el ensayo de densidad evidencia que la ceniza calcinada a 600 °C durante 3 horas es más compacta.

#### 4.1.2.1.2 Análisis granulométrico

Luego de realizar los ensayos de granulometría (Anexo 3) para cada tipo de ceniza, donde se consideró 350 g como peso del material inicial, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 16**

*Resultados del análisis granulométrico Ceniza 450°C a 2 horas*

TAMIZ No.	ABERTURA (mm)	PESO RET PARCIAL (g)	PESO RET ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.750	0	0	0.00	100.00
8	2.360	1	1	0.29	99.71
16	1.180	15	16	4.57	95.43
30	0.600	53	69	19.71	80.29
50	0.300	118	187	53.43	46.57
100	0.150	86	273	78.00	22.00
200	0.075	66	339	96.86	3.14
<b>Peso que pasa el tamiz 200:</b>		11	350	100.00	-

Módulo de finura

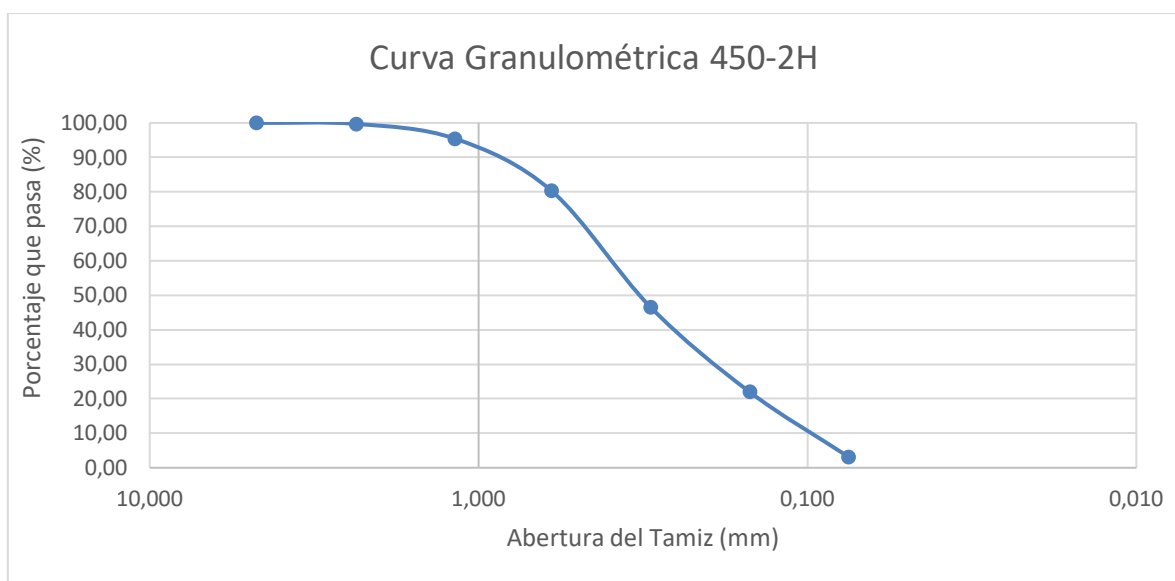
$$MF = \frac{\sum \%Ret. ac. (No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4)}{100}$$

$$MF = \frac{(78 + 53.43 + 19.71 + 4.57 + 0.29 + 0)}{100}$$

$$MF = 1.56$$

**Figura 7**

*Curva granulométrica Ceniza 450 °C a 2 horas*



**Tabla 17**

*Resultados del análisis granulométrico Ceniza 450°C a 3 horas*

TAMIZ No.	ABERTURA (mm)	PESO RET PARCIAL (g)	PESO RET ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.750	0	0	0.00	100.00
8	2.360	0	0	0.00	100.00
16	1.180	1	1	0.29	99.71
30	0.600	15	16	4.57	95.43
50	0.300	140	156	44.57	55.43
100	0.150	100	256	73.14	26.86
200	0.075	65	321	91.71	8.29
<b>Peso que pasa el tamiz 200:</b>		29	350	100.00	-

Módulo de finura

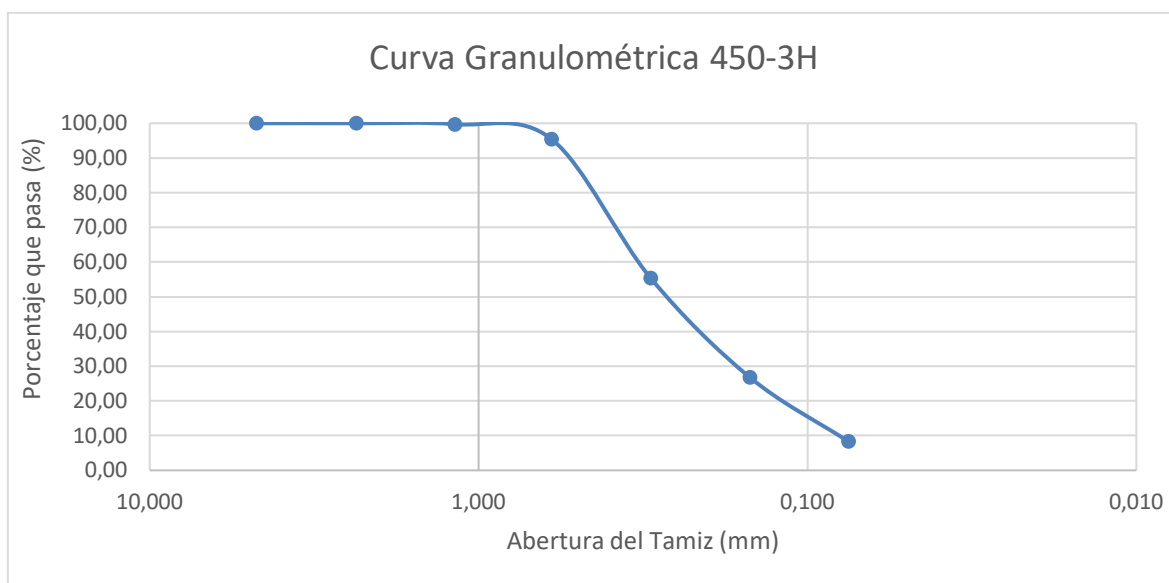
$$MF = \frac{\sum \%Ret. ac. (No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4)}{100}$$

$$MF = \frac{(73.14 + 44.57 + 4.57 + 0.29 + 0 + 0)}{100}$$

$$MF = 1.23$$

**Figura 8**

*Curva granulométrica Ceniza 450 °C a 3 horas*



**Tabla 18**

*Resultados del análisis granulométrico Ceniza 600°C a 2 horas*

TAMIZ No.	ABERTURA (mm)	PESO RET PARCIAL (g)	PESO RET ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.750	0	0	0.00	100.00
8	2.360	1	1	0.29	99.71
16	1.180	1	2	0.57	99.43
30	0.600	23	25	7.14	92.86
50	0.300	128	153	43.71	56.29
100	0.150	94	247	70.57	29.43
200	0.075	79	326	93.14	6.86
<b>Peso que pasa el tamiz 200:</b>		24	350	100.00	-

Módulo de finura

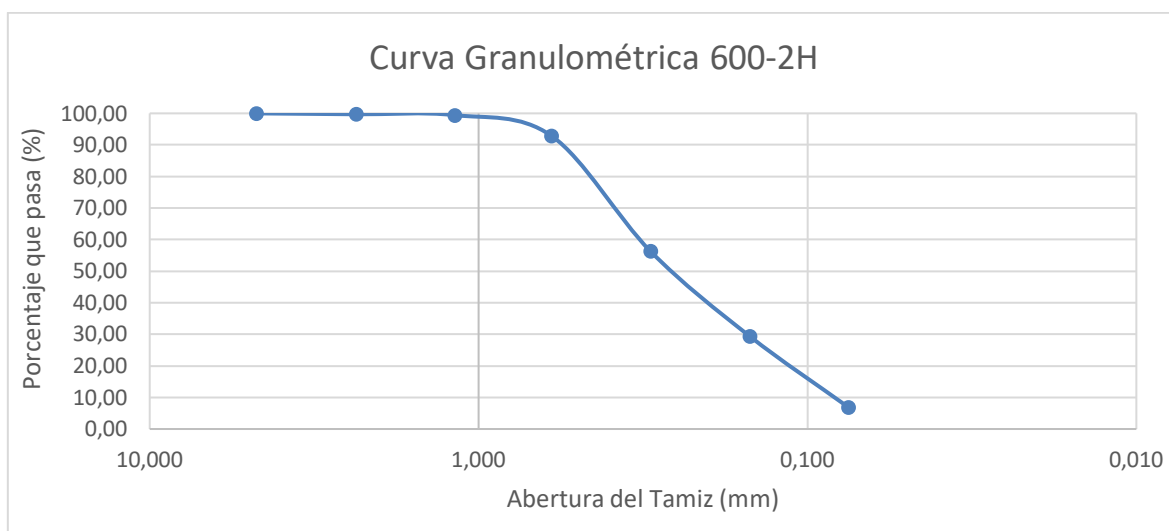
$$MF = \frac{\sum \%Ret. ac. (No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4)}{100}$$

$$MF = \frac{(70.57 + 43.71 + 7.14 + 0.57 + 0.29 + 0)}{100}$$

$$MF = 1.22$$

**Figura 9**

*Curva granulométrica Ceniza 600 °C a 2 horas*



**Tabla 19**

*Resultados del análisis granulométrico Ceniza 600°C a 3 horas*

TAMIZ No.	ABERTURA (mm)	PESO RET PARCIAL (g)	PESO RET ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.750	1	1	0.29	99.71
8	2.360	1	2	0.57	99.43
16	1.180	1	3	0.86	99.14
30	0.600	14	17	4.86	95.14
50	0.300	130	147	42.00	58.00
100	0.150	105	252	72.00	28.00
200	0.075	84	336	96.00	4.00
<b>Peso que pasa el tamiz 200:</b>		14	350	100.00	-

Módulo de finura

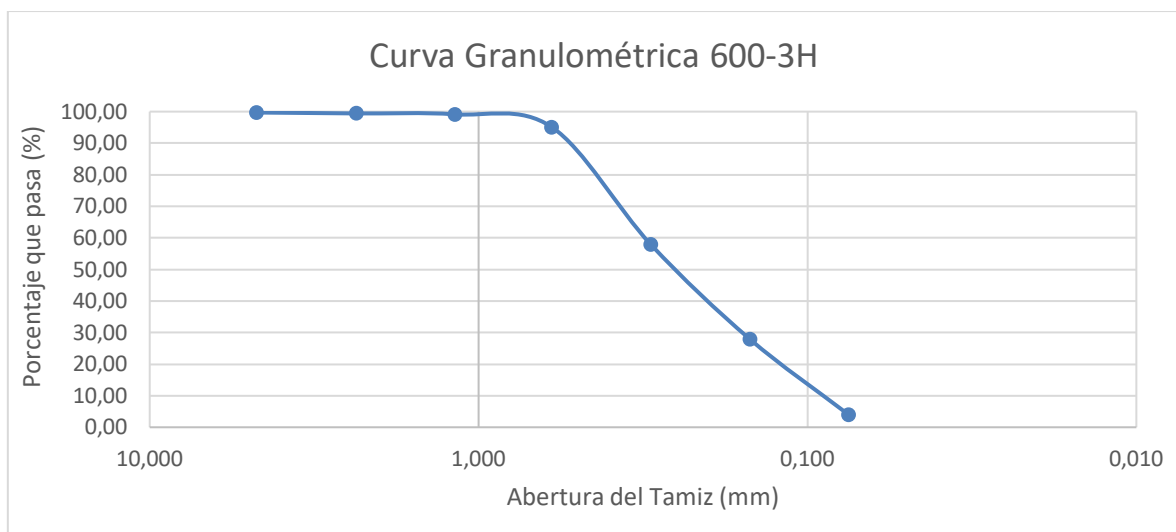
$$MF = \frac{\sum \%Ret. ac. (No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4)}{100}$$

$$MF = \frac{(72 + 42 + 4.86 + 0.86 + 0.57 + 0.29)}{100}$$

$$MF = 1.21$$

**Figura 10**

*Curva granulométrica Ceniza 600 °C a 3 horas*



Los resultados del ensayo de granulometría evidenciaron que la ceniza, pese al proceso de trituración previa todavía no presenta una distribución de partículas ideal para usarla como sustituto parcial del cemento, en donde el mayor porcentaje de peso retenido se concentra en todos los casos en el tamiz N°50 y mantienen un bajo contenido de ceniza pasante del tamiz N°200.

Por lo tanto, las cenizas necesitan un proceso adicional de trituración o molienda para reducir el tamaño de partícula, además de realizar un tamizado por el N°200, empleando únicamente la parte pasante para la elaboración de las mezclas de mortero, con la finalidad de contar con un material con características semejantes a la de los materiales cementantes en propiedades físicas.

#### 4.1.2.2 Caracterización del agregado fino

##### 4.1.2.2.1 Análisis granulométrico

**Tabla 20**

*Ensayo de granulometría del agregado fino*

TAMIZ No.	ABERTURA (mm)	PESO RET PARCIAL (g)	PESO RET ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
4	4.750	7.70	7.70	1.25	98.75
8	2.360	101.40	109.10	17.73	82.27
16	1.180	117.40	226.50	36.80	63.20
30	0.600	116.40	342.90	55.71	44.29
50	0.300	165.10	508.00	82.53	17.47
100	0.150	87.10	595.00	96.67	3.33
200	0.075	10.50	605.50	98.38	1.62
<b>Peso que pasa el tamiz 200:</b>		10.00	615.50	100.00	-

Con los resultados obtenidos se calculó el módulo de finura: 2.91; por lo tanto, la arena sí cumple con las características necesarias para ser utilizada como agregado fino.

$$MF = \frac{\sum \%Ret. ac. (No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4)}{100}$$

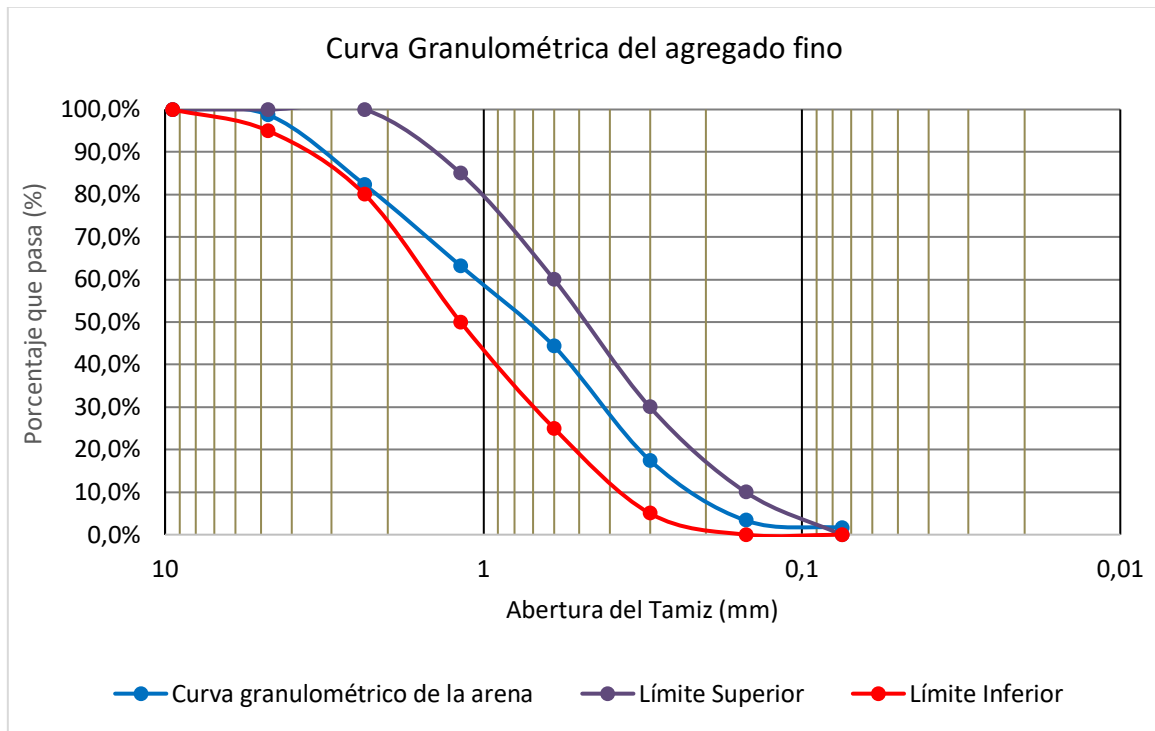
$$MF = \frac{(96.67 + 82.53 + 55.71 + 36.80 + 17.73 + 1.25)}{100}$$

$$MF = 2.91$$

De igual manera, cumple con los límites establecidos en la norma NTE INEN 872 presentados en la Tabla 2.

**Figura 11**

*Curva granulométrica agregado fino*



#### 4.1.2.3 Dosificación

La dosificación utilizada se basa en la norma INEN 488:2009 que propone la dosificación en peso para 9 cubos de mortero de 50x50x50 mm; las cantidades exactas para elaborar un cubo de mortero con cada tipo de ceniza se muestran en el Anexo 5. Para obtener la cantidad necesaria para flexión se realiza una relación con los valores establecidos en la norma, en la Tabla 21 se muestra lo necesario para elaborar 9 vigas de 40x40x160 mm

**Tabla 21**

*Cantidad de ceniza en reemplazo parcial del cemento para flexión*

Elemento	Patrón	600 °C 2 Horas - 10%
Arena (g)	4167.68	4167.68
Cemento (g)	1515.52	1363.97
Agua (ml)	757.76	723.32
Ceniza (g)	0	151.55
a/c	0.50	0.48

### 4.1.3 Fase 3: Ensayos de Laboratorio

#### 4.1.3.1 Fluidéz de mortero

Las pruebas de mortero se realizaron en estado fresco siguiendo el procedimiento escrito en la norma ASTM C1437-15 Método de prueba estándar para Flujo de mortero de cemento hidráulico, algunos tipos de ceniza presentan tendencia a absorber mayor cantidad de agua y otros menos, por lo que se debió realizar correcciones en la cantidad de agua para estar en el límite establecido por la norma NTE INEN 488:2009 Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista, la cual recomienda valores de 105 a 115, el procedimiento se evidencia en el Anexo 6 y el cálculo en el Anexo 7 que arroja los siguientes resultados:

**Tabla 22**

*Resultado de fluidez en mortero*

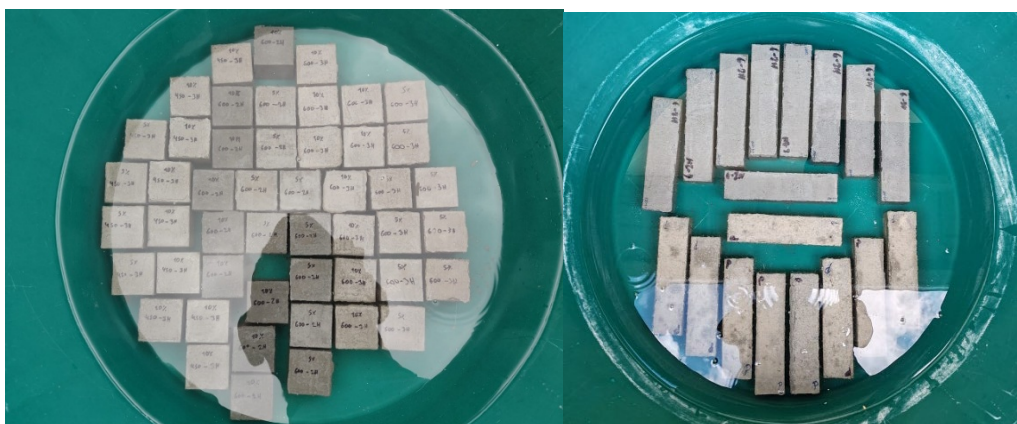
<b>Muestra</b>	<b>Fluidéz %</b>	<b>Relación a/c</b>
<b>Patrón</b>	114.5	0.50
<b>450 °C - 2H 10%</b>	105	0.50
<b>450 °C - 2H 5%</b>	108.5	0.50
<b>450 °C - 3H 10%</b>	115	0.55
<b>450 °C - 3H 5%</b>	106.5	0.50
<b>600 °C - 2H 10%</b>	105.5	0.477
<b>600 °C - 2H 5%</b>	105	0.455
<b>600 °C - 3H 10%</b>	111	0.50
<b>600 °C - 3H 5%</b>	105.5	0.475

Se puede apreciar que mientras mayor sea la cantidad de ceniza presente en el mortero se necesita una mayor cantidad de agua para mantener la consistencia de la mezcla [41], lo que significa que la ceniza incrementa la absorción de agua.

A continuación, se presentan las probetas de mortero realizadas con la dosificación corregida y debidamente curadas hasta alcanzar la edad correspondiente para los ensayos.

**Figura 12**

*Probetas de mortero curadas previo al ensayo de compresión y flexión*



#### **4.1.3.2 Resistencia a la compresión en cubos de 50x50x50 mm**

Se evalúa la resistencia a compresión de las probetas a los 7, 14 y 28 días, los resultados se resumen en la Tabla 23, según los ensayos realizados la resistencia promedio de los cubos de mortero con la dosificación establecida debe ser de 22.22 MPa a los 28 días. En el Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10 se muestra identificación, medidas, fuerza, deformación máxima y esfuerzo de las probetas a 7, 14 y 28 días respectivamente. Adicionalmente, se muestran las fallas de cada cubo por separado e imágenes de la rotura en el Anexo 11, Anexo 12 y Anexo 13.

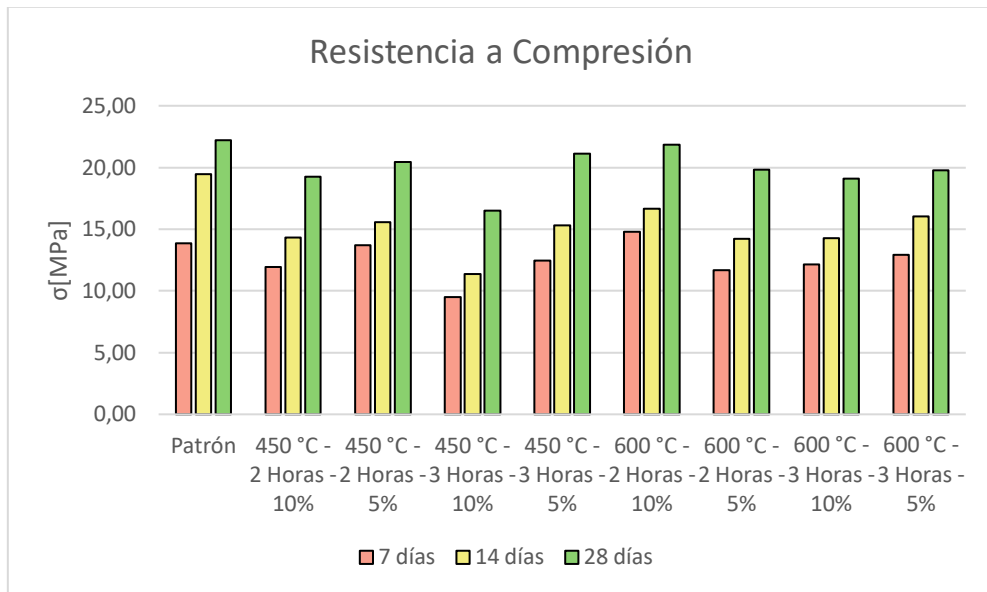
**Tabla 23**

*Resultados de compresión a los 7, 14 y 28 días*

<b>Resistencia a la compresión</b>					
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Reemplazo (%)</b>	<b>7 días (Mpa)</b>	<b>14 días (MPa)</b>	<b>28 días (MPa)</b>
Patrón	0	0	13.84	19.45	22.22
450	2	10	11.95	14.31	19.26
450	2	5	13.73	15.59	20.45
450	3	10	9.49	11.38	16.52
450	3	5	12.45	15.29	21.10
600	2	10	14.77	16.67	21.83
600	2	5	11.69	14.21	19.85
600	3	10	12.15	14.29	19.12
600	3	5	12.95	16.01	19.79

**Figura 13**

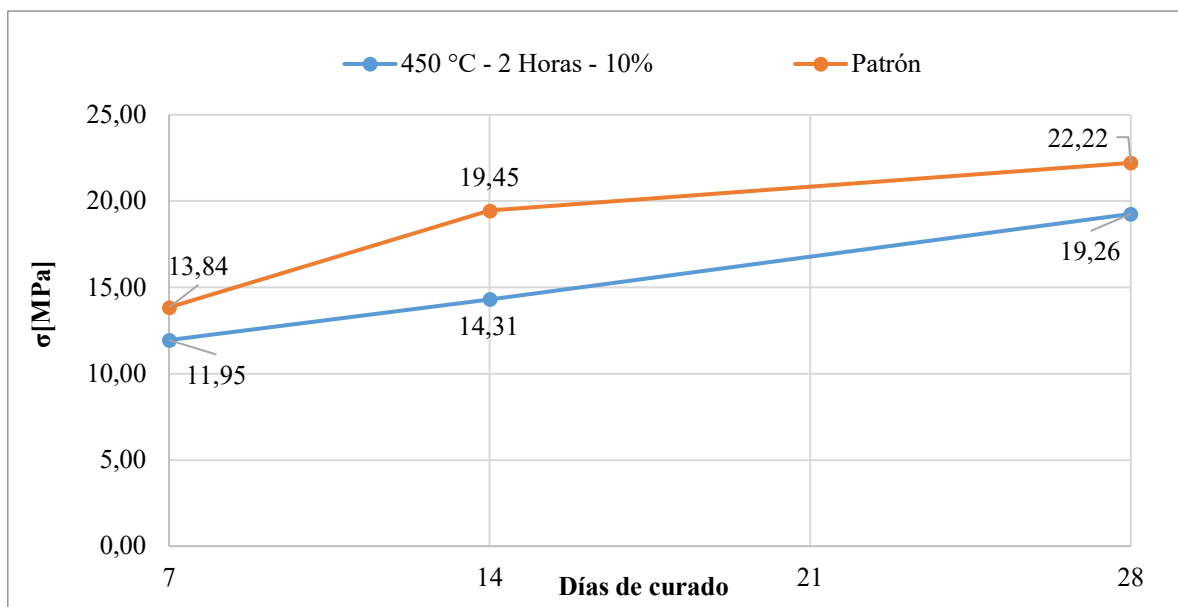
*Resistencia a la Compresión a 7, 14 y 28 días*



Se evidencia una clara disminución de la resistencia a los 28 días por parte de las probetas con sustitución, dando mejor resultado aquellas que tienen 5% de reemplazo de material cementante por cenizas de huesos bovinos, a excepción de las que presentan 10% de ceniza calcinada a 600°C por 2 horas, las cuales mostraron el mejor resultado a 28 días donde se obtiene el 99% de resistencia, siendo esta de 21.83 MPa contra 22.22 MPa que arroja la muestra patrón, se muestran de forma detallada las curvas para cada dosificación:

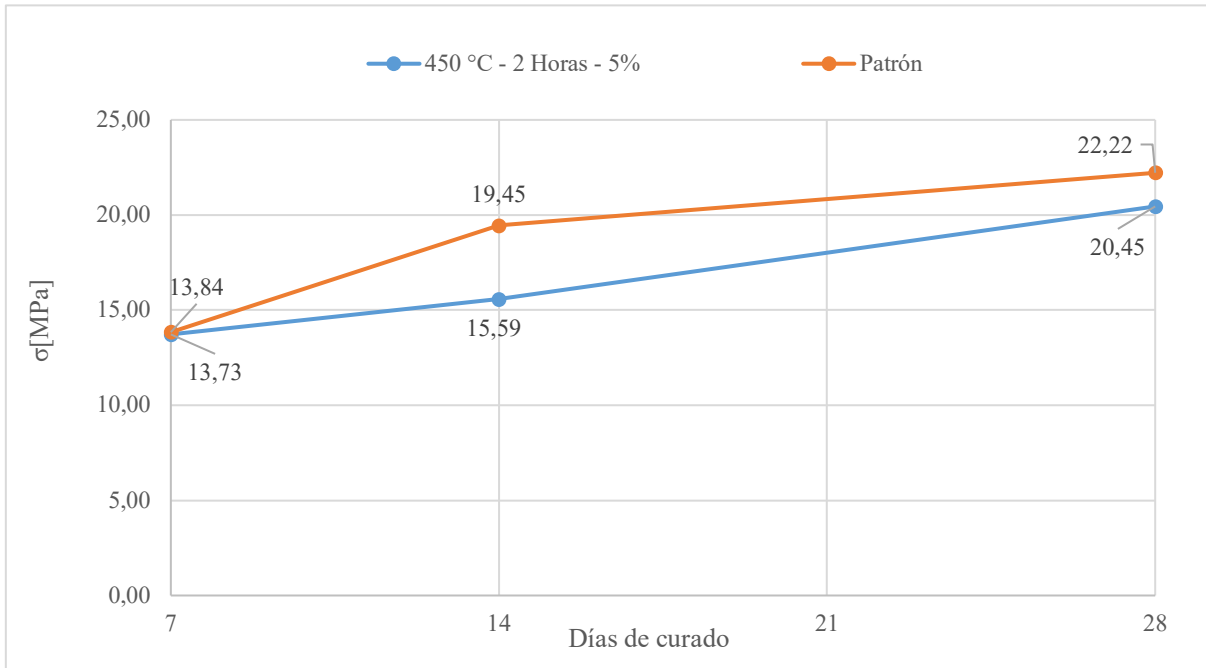
**Figura 14**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 450°C por 2 horas*



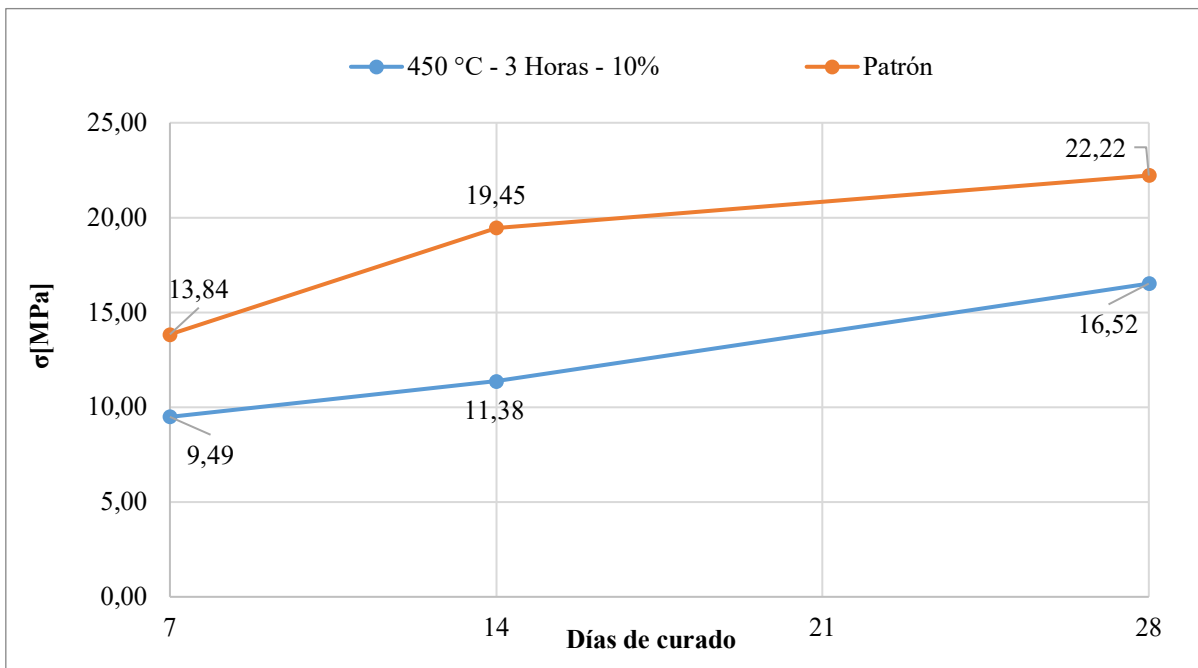
**Figura 15**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 450°C por 2 horas*



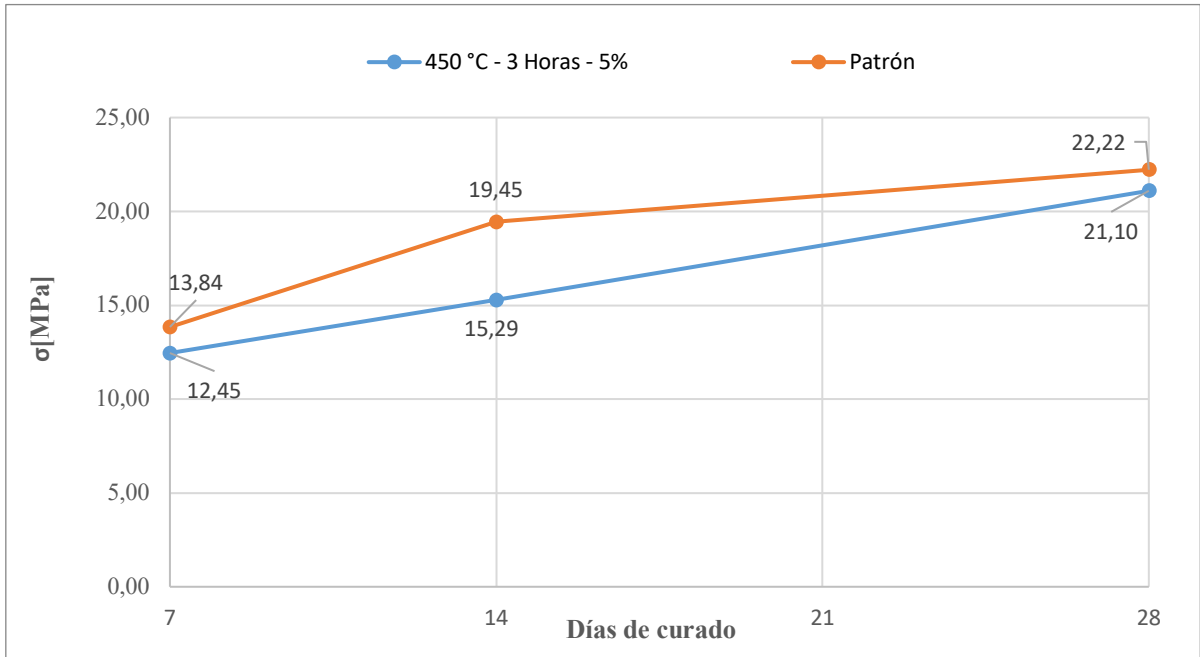
**Figura 16**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 450°C por 3 horas*



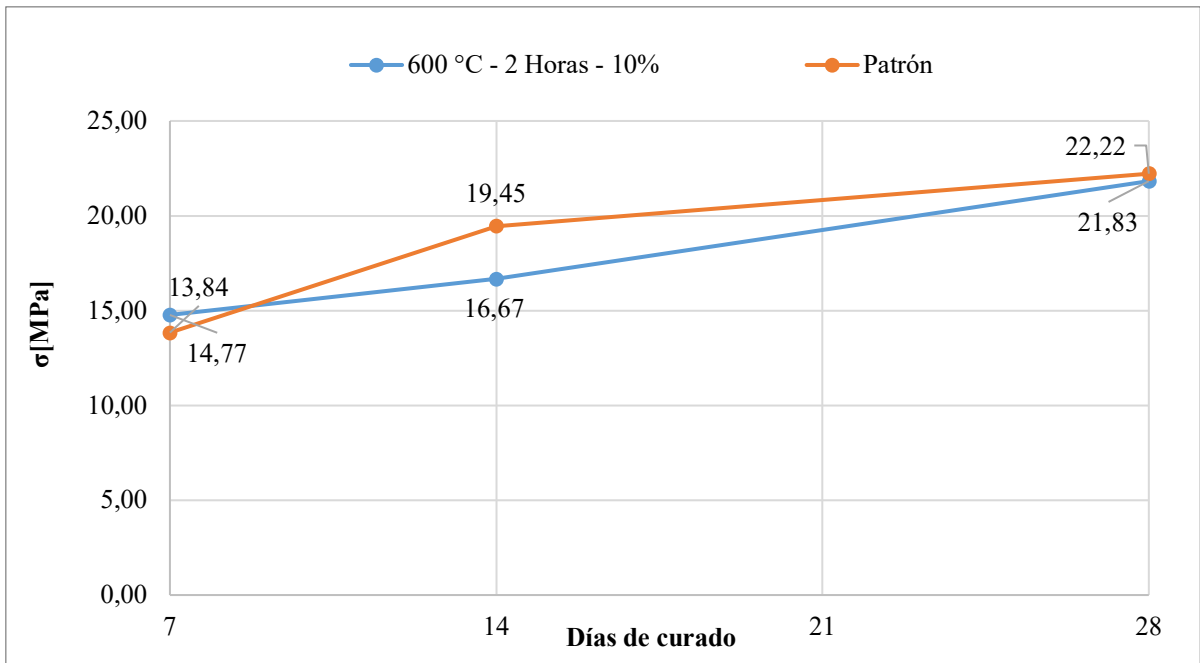
**Figura 17**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 450°C por 3 horas*



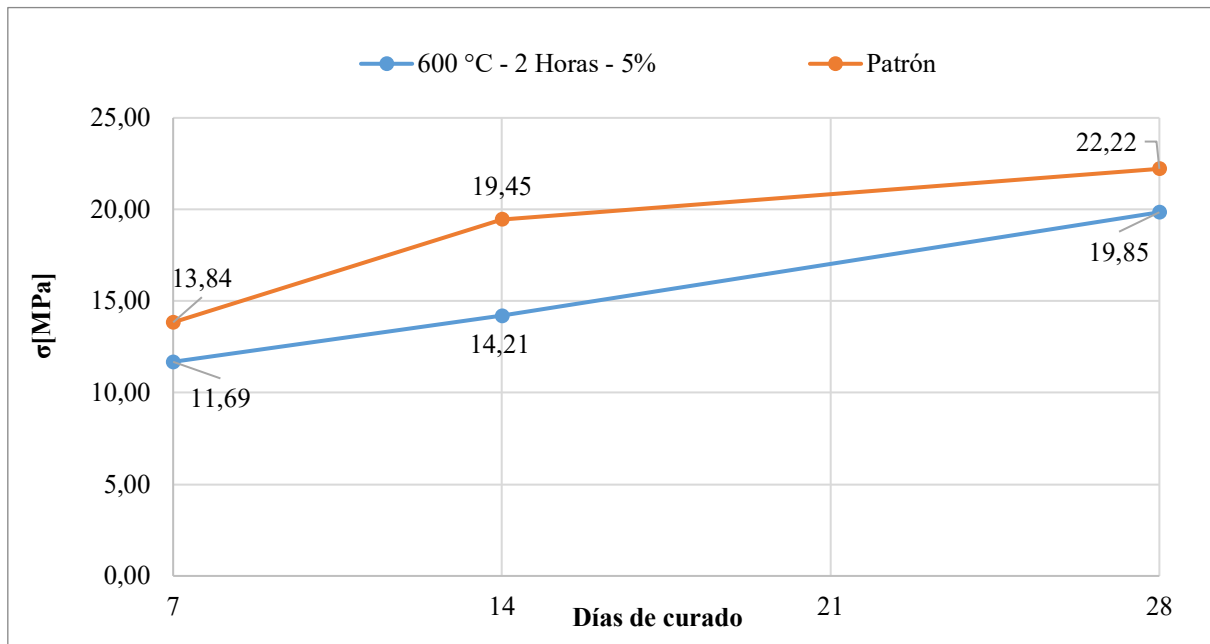
**Figura 18**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 600°C por 2 horas*



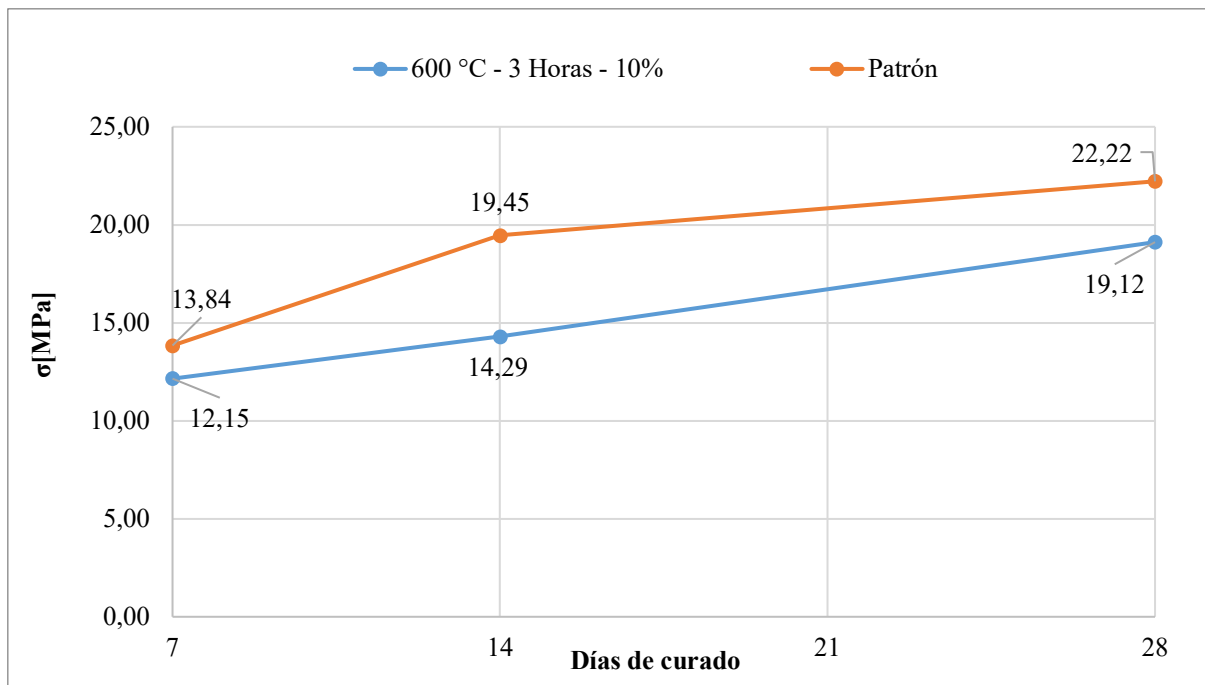
**Figura 19**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 600°C por 2 horas*



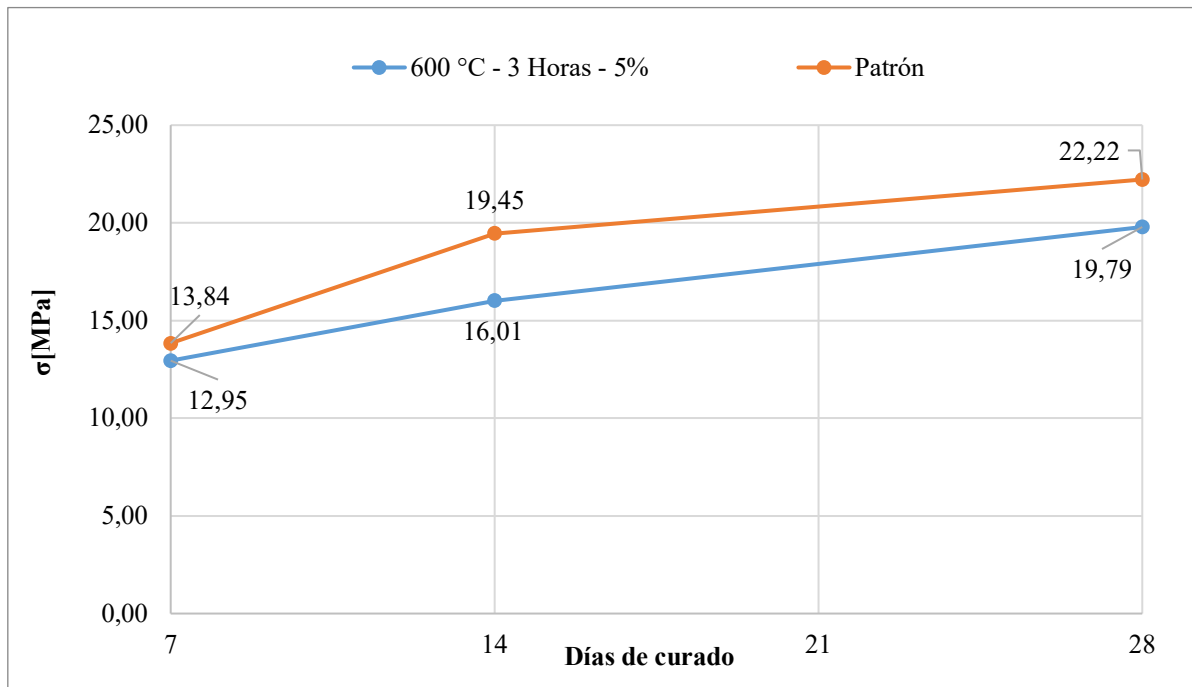
**Figura 20**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 10% a 600°C por 3 horas*



**Figura 21**

*Curva de resistencia mortero con reemplazo de 5% a 600°C por 3 horas*



#### 4.1.3.3 Resistencia a la Flexión en vigas de 40x40x160 mm

Debido a limitaciones en el material, únicamente se realizaron 3 probetas a 7, 14 y 28 días de la mejor dosificación, es decir, cuya resistencia a la compresión sea la mejor en comparación con las demás. Para este caso, la elegida fue de 600 °C durante 2 horas con 10%, las fallas respectivas en las probetas de la muestra patrón y la mejor dosificación se presentan en el Anexo 16 y Anexo 17 respectivamente.

Se evidencia en la Tabla 24 que, al aumentar la cantidad de ceniza en las probetas, suele observarse una menor resistencia a la flexión.

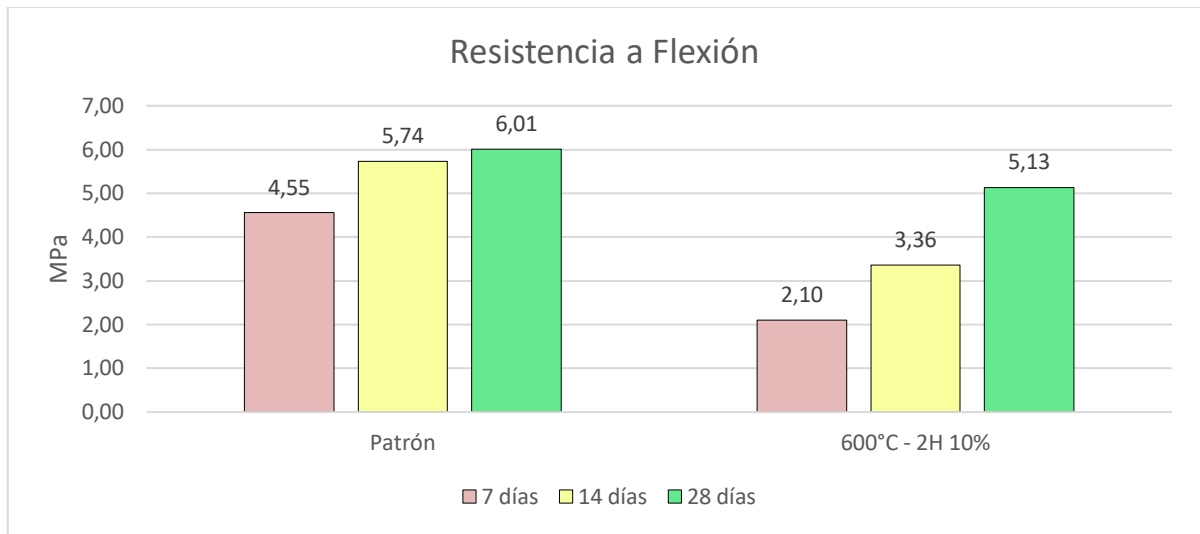
**Tabla 24**

*Resultados de flexión*

	Resistencia (Mpa)		
	7 días	14 días	28 días
<b>Patrón</b>	4.55	5.74	6.01
<b>600°C - 2H 10%</b>	2.10	3.36	5.13

**Figura 22**

*Variación de la resistencia promedio a flexión en los tipos de mortero*



Las vigas con reemplazo de ceniza presentan una reducción de 14.65% en su resistencia a flexión a comparación con la muestra patrón.

También se realizó un análisis de la densidad de las probetas, por lo que se midieron todas las vigas ensayadas, los datos se muestran en el Anexo 14, y posteriormente se calcula la densidad, véase Anexo 15, Los resultados se muestran en la Tabla 25.

**Tabla 25**

*Densidad promedio de probetas ensayadas a flexión*

Dosificación	Densidad (g/cm3)
Patrón	2.2061
600°C - 2H 10%	2.2062

Se demuestra que la diferencia de densidades es muy pequeña, por lo que la inclusión de ceniza no afecta directamente al peso.

#### 4.1.4 Coeficientes de correlación de Spearman

Debido a que existen valores repetidos en la temperatura, el tiempo de calcinación y el porcentaje de ceniza de hueso de reemplazo, el coeficiente de Spearman se considera más apropiado para interpretar la tendencia general de la relación entre las variables:

##### 4.1.4.1 Temperatura – Resistencia

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

$$\rho = 1 - \frac{6(66)}{8(8^2 - 1)}$$

$$\rho = 0.2143$$

Para la relación entre temperatura y resistencia, se obtuvo un coeficiente de Spearman de  $\rho = 0,2143$  (Anexo 18). Este valor indica una correlación positiva débil entre las dos variables, lo que sugiere que el aumento de la temperatura podría estar asociado a un ligero incremento de la resistencia del material. Sin embargo, dado que el coeficiente es cercano a cero, la relación entre las variables es débil y, por lo tanto, la temperatura no parece ejercer una influencia significativa sobre la resistencia en el rango evaluado.

#### 4.1.4.2 Tiempo de calcinación – Resistencia

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

$$\rho = 1 - \frac{6(106)}{8(8^2 - 1)}$$

$$\rho = -0.2619$$

Para la relación entre el tiempo de calcinación y la resistencia, se obtuvo un coeficiente de correlación de rangos de Spearman de  $\rho = -0,2619$  (Anexo 19). Este resultado indica una correlación negativa débil, lo que sugiere que a medida que aumenta el tiempo de exposición, la resistencia del material tiende a disminuir ligeramente. La magnitud del coeficiente indica que esta relación no es fuerte, pero sí muestra una tendencia inversa entre las dos variables.

#### 4.1.4.3 Porcentaje de reemplazo – Resistencia

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

$$\rho = 1 - \frac{6(106)}{8(8^2 - 1)}$$

$$\rho = -0.2619$$

Para la relación entre el porcentaje de reemplazo y la resistencia, también se obtuvo un coeficiente de correlación de rangos de Spearman de  $\rho = -0,2619$  (Anexo 20), lo que indica una correlación negativa débil. El hecho de que este valor sea idéntico al obtenido para la relación entre el tiempo y la resistencia se debe a que el coeficiente de correlación de Spearman se calcula a partir del orden o rango de los datos. En este caso, la distribución de los rangos del porcentaje de ceniza de huesos y del tiempo de exposición en el horno genera un patrón de clasificación muy similar al de los valores de resistencia, lo que produce diferencias de rango equivalentes en el cálculo. Como resultado, el coeficiente obtenido es el mismo, lo que indica que ambas variables presentan una relación similar con la resistencia en el conjunto de datos analizado.

## 4.2 Discusión

De la matriz de priorización el porcentaje más común de reemplazo fue el de 10%, dicho por Elkin Palomino [17], Jhonny Vaca [18] y Felipe Pedraza [40], al obtener los resultados se evidencia que la dosificación con 10% de reemplazo de ceniza calcinada a 600°C por 2 horas en horno a diésel arrojó la mayor resistencia entre todas las probetas con sustitución parcial de material cementante, siguiendo la tendencia, en el estudio realizado por Felipe Pedraza [40], una de sus dosificaciones plantea un 10% de reemplazo con ceniza calcinada a 600°C en horno mufla por 1 o 2 horas, presentando el mismo proceso de trituración y resultados similares, ya que esta dosificación resultó en una de las mejores resistencias en el concreto además de una reducción en la relación a/c, aparte de ser evaluado en concreto se diferencia en que el único requisito de granulometría fue que la ceniza pasara el tamiz No.100, a diferencia de esta investigación que requirió pasar el tamiz No.200, similar al estudio realizado por Jhonny Vaca [18] cuya ceniza se calcinó a 600°C por 1 hora en un horno mufla, usando un reemplazo de 10% y dando la mayor resistencia de todas sus probetas de concreto, sin embargo en su investigación afirma que esta ceniza genera una mayor absorción de agua, lo que inevitablemente aumenta la relación a/c, esta diferencia puede ser debido al menor tiempo de calcinación que tuvo esta ceniza ya que a bajas temperaturas la materia calcinada suele ser más irregular, porosa, menos fina y por ello puede llegar a retener mayor humedad.

La ceniza con 2 horas de calcinación arrojó mejor resultado que aquella calcinada con 3 horas, lo que podría indicar que un menor tiempo de calcinación resultaría en una ceniza con atributos más similares al cemento, sin embargo esto es contradictorio a Christian Gil [39] quien al utilizar un reemplazo de 5% y 10% de ceniza calcinada a 600°C por alrededor de 18 horas obtuvo una resistencia similar a la patrón, e inclusive con 5% de sustitución los valores superaron a la muestra sin ceniza, esto puede deberse a que en su proceso de calcinación el horno usado fue una caneca industrial cuyo combustible fue carbón y leña seca, dejando a los huesos dentro por casi todo un día, lo que significaría una falta en el control de la temperatura, otro factor que podría haber afectado el resultado es que su proceso de limpieza del hueso es diferente, siendo que aún se puede apreciar una cantidad considerable de carne y grasa en los huesos antes de estos ser introducidos en el horno.

Por otra parte la dosificación con el resultado menos favorable fue al utilizar un 10% de reemplazo de ceniza calcinada a 450°C por 3 horas, y dando un resultado mejor aquella calcinada a esta misma temperatura por 2 horas, lo que de igual manera podría indicar que un menor tiempo es más favorable, sin embargo, Elkin Palomino [17] en su investigación calcina sus huesos a esta misma temperatura por 30 horas, dando con 10% de reemplazo un mejor resultado que la muestra patrón, este resultado puede deberse además del tiempo a un distinto proceso de limpieza donde se usaron químicos como hipoclorito de sodio, 2 procesos de calentamiento además de la limpieza con bisturí y cepillo de alambre, los huesos no eran específicamente del fémur sino que fueron escogidos aleatoriamente, por último el horno usado fue uno de cámara con circulación de aire que mantiene una temperatura más uniforme en toda la cámara.

Los resultados a flexión muestran una reducción en la resistencia de hasta 14.65% comparado con la dosificación patrón, esta reducción también la comparte Palomino [17] en cuyos resultados se puede apreciar un decremento de 18.34% en el módulo de ruptura, siendo sus vigas de concreto con dimensiones de 150x150x400 mm; este valor más bajo puede deberse a que los huesos utilizados en su investigación no fueron específicamente fémur, sino que fueron elegidos aleatoriamente.

Se aprecia un retardo en la evolución de la resistencia a edades tempranas entre 7 a 14 días, y un salto considerable de 14 a 28 días, como explica Affan [42] en su investigación al incluir puzolanas naturales la dilución del Clinker reduce el número de productos para hidratación a tempranas edades, por lo cual la resistencia muestra un retraso en su desarrollo que posteriormente se recupera.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1 Conclusiones**

La sustitución de material cementante por cenizas de huesos de ganado vacuno en su mayoría reducen la resistencia a compresión del mortero, con porcentajes de 1.76% hasta 25.65% en su resistencia final a 28 días, lo que indicaría que no es un material cuya inclusión mejore directamente la resistencia a esfuerzos en el mortero, sin embargo si se usa la dosificación adecuada se puede emplear como alternativa de sustituto del cemento, siendo esta una propuesta para el uso óptimo de los desperdicios generados por canales y carnicerías en el campo constructivo.

La ceniza de huesos calcinados de ganado vacuno tras su procesamiento logra obtener características similares a las del cemento portland, empezando por su granulometría la cual pasa el tamiz No.200 al igual que el cemento y su capacidad para absorber agua, la densidad de la ceniza varía de 2.63 a 2.99 contra la del cemento tipo GU que es de 2.93 por lo que se puede afirmar que es un buen sustituto, siendo la principal diferencia en que en la mayoría de casos, la ceniza absorbe una mayor cantidad de agua ya que maneja porcentajes de absorción entre 9.17% a 32.28%, lo que aumenta la relación a/c necesaria para lograr la fluidez del mortero.

Se establece como la mejor dosificación aquella con 10% de reemplazo de ceniza calcinada a 600°C por 2 horas dando esta una resistencia a la compresión de 21.83 MPa, aproximándose a la muestra sin reemplazo teniendo solo una reducción del 1.76%, por el contrario se denota una menor resistencia a esfuerzos de flexión con una reducción de hasta 14.65% lo que indicaría que este tipo de ceniza posee atributos que le asemejan al cemento portland y su uso como sustituto genera una capacidad compresiva similar a costo de un decremento considerable de la capacidad flexiva del mortero.

### **5.2 Recomendaciones**

- Para futuras investigaciones, se recomienda realizar ensayos de resistencia a la compresión en diferentes edades de curado, incluyendo periodos anteriores a los 7 días, así como a los 21 y posteriores a 28 días, con el propósito de analizar de manera amplia la evolución del comportamiento mecánico del mortero, ya que se observó un aumento significativo en la resistencia entre 14 y 28 días y una ganancia de resistencia tardía en los primeros días de curado en relación con la muestra patrón.
- Se recomienda completar el estudio con otros ensayos de laboratorio que permitan conocer características adicionales de las cenizas de huesos de ganado vacuno.
- Se sugiere realizar un control riguroso de las temperaturas y tiempos de calcinación que permitan tener mayor precisión en los resultados; adicionalmente, considerar otros métodos de enfriamiento posteriores a la calcinación para analizar sus efectos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Fernández-Sánchez and F. Rodríguez-López, “Propuesta para la integración de criterios sostenibles en los proyectos de ingeniería civil: Un caso práctico,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 524, pp. 65–74, 2011, doi: 10.3989/ic.10.043.
- [2] S. Wu *et al.*, “Global CO<sub>2</sub> uptake by cement materials accounts 1930–2023,” *Scientific Data 2024 11:1*, vol. 11, no. 1, pp. 1409-, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41597-024-04234-8.
- [3] P. J. . Gerber, “Tackling climate change through livestock : a global assessment of emissions and mitigation opportunities,” p. 115, 2013.
- [4] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri, and J. N. Farahani, “Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 176–187, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.010.
- [5] J. M. Paris, J. G. Roessler, C. C. Ferraro, H. D. Deford, and T. G. Townsend, “A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 121, pp. 1–18, May 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.013.
- [6] L. Garba, A. Alhassan, A. Asger, and A. Shafiu, “THE SUITABILITY OF ANIMAL BONE ASH AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT IN CONCRETE PRODUCTION,” *Journal of Inventive Engineering and Technology (JIET)* , vol. 2, pp. 1–8, Feb. 2022, Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/359415344\\_THE\\_SUITABILITY\\_OF\\_ANIMAL\\_BONE\\_ASH\\_AS\\_PARTIAL\\_REPLACEMENT\\_OF\\_CEMENT\\_IN\\_CONCRETE\\_PRODUCTION](https://www.researchgate.net/publication/359415344_THE_SUITABILITY_OF_ANIMAL_BONE_ASH_AS_PARTIAL_REPLACEMENT_OF_CEMENT_IN_CONCRETE_PRODUCTION)
- [7] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, “La ceniza de huesos como portador de fósforo en suplementos minerales,” Oct. 2012, Accessed: Apr. 06, 2026. [Online]. Available: [www.inta.gov.ar/mercedes](http://www.inta.gov.ar/mercedes)
- [8] V. Bindiganavile and M. Hoseini, “Foamed concrete,” *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, pp. 231–255, 2008, doi: 10.1533/9781845694685.231.
- [9] J. I. Mora Samacá, “Tejido óseo, una nueva alternativa en agregados para el concreto,” *Ingeniería Solidaria*, vol. 15, no. 27, pp. 1–38, Jan. 2019, doi: 10.16925/2357-6014.2019.01.07.

- [10] B. J. Toro García, “Hormigón ecológico como material sostenible en construcción,” 2019, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/25081>
- [11] C. Bravo-Ortega and C. Bravo-Ortega, “Productividad en el sector agrícola: Una visión global desde una perspectiva latinoamericana,” *International journal of agriculture and natural resources*, vol. 48, no. 3, pp. 288–302, Dec. 2021, doi: 10.7764/IJANR.V48I3.2341.
- [12] D. S. De Guzmán, “Tecnología del concreto y del mortero,” p. 349, 2001, Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/TECNOLOGIA\\_DEL\\_CONCRETO\\_Y\\_DE\\_L\\_MORTERO.html?hl=es&id=EWq-QPJhsRAC](https://books.google.com/books/about/TECNOLOGIA_DEL_CONCRETO_Y_DE_L_MORTERO.html?hl=es&id=EWq-QPJhsRAC)
- [13] I. Izquierdo, O. Soto Izquierdo, M. Ramalho, I. Izquierdo, O. Soto Izquierdo, and M. Ramalho, “Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento,” *Revista ingeniería de construcción*, vol. 33, no. 3, pp. 229–240, 2018, doi: 10.4067/S0718-50732018000300229.
- [14] W. Martinez-Molina *et al.*, “Effect of the Addition of Agribusiness and Industrial Wastes as a Partial Substitution of Portland Cement for the Carbonation of Mortars,” *Materials 2021, Vol. 14, Page 7276*, vol. 14, no. 23, p. 7276, Nov. 2021, doi: 10.3390/MA14237276.
- [15] S. K. Onsongo, J. Olukuru, and O. Mwabonje, “Circular Economy in the Cement Industry: a Systematic Review of Sustainability Assessment and Justice Considerations in Local Community Development,” *Circular Economy and Sustainability 2025 5:5*, vol. 5, no. 5, pp. 4221–4241, Jun. 2025, doi: 10.1007/S43615-025-00606-3.
- [16] I. Netinger Grubeša, D. Šamec, S. Juradin, and M. Hadzima-Nyarko, “Utilizing Agro-Waste as Aggregate in Cement Composites: A Comprehensive Review of Properties, Global Trends, and Applications,” *Materials*, vol. 18, no. 10, p. 2195, May 2025, doi: 10.3390/MA18102195.
- [17] E. R. Palomino-Guzmán, A. González-López, J. Olmedo-Montoya, L. A. Sanchez-Echeverri, and N. J. Tovar-Perilla, “A Sustainable Approach Using Beef and Pig Bone Waste as a Cement Replacement to Produce Concrete,” *Sustainability 2024, Vol. 16*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/SU16020701.

- [18] J. S. Vaca Pillajo, “Análisis de la resistencia a compresión del concreto con reemplazo parcial del cemento por osamentas de animales calcinadas y pulverizadas.,” 2022, Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23505>
- [19] Konitufe Claudius, A. S. Baba, and A. Abubakar, “Influence of Pulverized Animal Bone and Animal Bone Ash on the Mechanical Properties of Normal Strength Concrete using Response Surface Method,” *CONSTRUCTION*, vol. 3, no. 1, pp. 63–74, Apr. 2023, doi: 10.15282/CONSTRUCTION.V3I1.9097.
- [20] T. J. Awoyemi, K. E. Ibedu, J. M. Kaura, and A. Lawan, “STRENGTH-DURABILITY PROPERTIES AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF CONCRETE CONTAINING COW BONE ASH AND BENTONITE,” *FUDMA JOURNAL OF SCIENCES*, vol. 7, no. 5, pp. 39–49, Oct. 2023, doi: 10.33003/FJS-2023-0705-1900.
- [21] S. B. V. S. M. Varma, “An Effective Study on Utilizing Bone Powder Ash as Partial Replacement of Construction Material,” *IJITR) INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND RESEARCH*, no. 4, pp. 3060–3062, Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: <http://www.ijitr.com>
- [22] R. Abdulwahab, B. D. Ikotun, A. A. Raheem, E. A. Adetoro, R. Salihu, and O. A. Oribamise, “Effects of cow bone ash as a partial replacement of cement in the production of concrete,” *Journal of Building Pathology and Rehabilitation 2025 10:2*, vol. 10, no. 2, pp. 112-, Apr. 2025, doi: 10.1007/S41024-025-00627-3.
- [23] L. Garba, A. Musa, A. Bhojiya, and S. Ibrahim, “(PDF) THE SUITABILITY OF ANIMAL BONE ASH AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT IN CONCRETE PRODUCTION,” *Journal of Inventive Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 1–8, 2022, Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/359415344\\_THE\\_SUITABILITY\\_OF\\_ANIMAL\\_BONE\\_ASH\\_AS\\_PARTIAL\\_REPLACEMENT\\_OF\\_CEMENT\\_IN\\_CONCRETE\\_PRODUCTION](https://www.researchgate.net/publication/359415344_THE_SUITABILITY_OF_ANIMAL_BONE_ASH_AS_PARTIAL_REPLACEMENT_OF_CEMENT_IN_CONCRETE_PRODUCTION)
- [24] C. Shekhar and Panipat Unit, *Cement Strength Development 1761194958 | PDF | Concrete | Cement*. Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/947031229/Cement-Strength-Development-1761194958?utm>
- [25] L. Y. Gómez-Zamorano, C. A. Iñiguez-Sánchez, and B. Lothenbach, “Microstructure and mechanical properties of composite cements: reactivity of pozzolanic and

- hydraulic cementitious materials,” *Revista ALCONPAT*, vol. 5, no. 1, pp. 18–30, Jan. 2015, doi: 10.21041/RA.V5I1.74.
- [26] “Tecnología del Concreto: Guía Esencial | PDF | Cemento | Propiedades del agua.” Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/352040643/Libro-Sintesis-de-La-Tecn-Del-Concreto#content=query:puzolana,pageNum:5,indexOnPage:0,bestMatch:false>
- [27] M. Reinmüller *et al.*, “Formation and transformation of mineral phases in biomass ashes and evaluation of the feedstocks for application in high-temperature processes,” *Renew. Energy*, vol. 210, pp. 627–639, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.RENENE.2023.04.072.
- [28] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, “CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials,” *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, pp. 10–14, 2006, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://repositori.mypolycc.edu.my/jspui/handle/123456789/4614>
- [29] R. Salamanca Correa, “La tecnología de los morteros,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 11, pp. 41–48, Dec. 2001, doi: 10.18359/RCIN.1353.
- [30] P. C. Aïtcin, “Portland cement,” *Science and Technology of Concrete Admixtures*, pp. 27–51, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5.
- [31] S. Wilkie and T. Dyer, “Mortar and Concrete: Precursors to Modern Materials,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 18, no. 9, pp. 1440–1463, Sep. 2024, doi: 10.1080/15583058.2023.2235319;JOURNAL:JOURNAL:UARC20;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:UARC20;WGROU:STRING:PUBLICATION.
- [32] F. C. Montes, J. H. Valencia, G. P. Cedeño, J. Cedeño, E. Santos, and C. Aguirre, “Dosificación de mortero con cascara de arroz y comprobación de adherencia en paredes de bloques de concreto,” *Yachana*, vol. 2, no. 1, 2013, doi: 10.62325/10.62325/YACHANA.V2.N1.2013.197.
- [33] “ASTM C33-03 Español | PDF | Hormigón | Cemento.” Accessed: Dec. 15, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/363156459/ASTM-C33-03-Espanol>
- [34] S. Atabo, S. Hena, A. Jaji, and A. Bodinga, “View of Bovine Skeleton Preparation Using Hot Water Technique for Anatomical Studies,” *Asian J. Res. Anim. Vet. Sci.*, 2019, Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: <https://journalajravs.com/index.php/AJRAVS/article/view/65/129>

- [35] R. Havaldar, S. C. Pilli, and B. B. Putti, "Insights into the effects of tensile and compressive loadings on human femur bone," *Adv. Biomed. Res.*, vol. 3, no. 1, p. 101, 2014, doi: 10.4103/2277-9175.129375.
- [36] E. Merino and L. Bojórquez, "Manual Proceso Analítico Jerárquico (AHP)," Feb. 2023, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.rua.unam.mx/recursos/descargar/87659>
- [37] "NTE INEN 488-2: Métodos para determinar resistencia del mortero - Studocu." Accessed: Jan. 24, 2026. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/nte-inen-488-2-resistencia-a-la-compresion-en-cubos-de-mortero/23206008>
- [38] S. Getahun and B. Bewket, "Journal of Civil & Environmental Engineering A Study on Effect of Partial Replacement of Cement by Cattle Bone Ash in Concrete Property," 2021.
- [39] C. D. Gil-Marciales, "Elaboración de un concreto de 3000 psi con ceniza de huesos de vaca como remplazo parcial del cemento convencional," 2024, *Universidad Católica de Colombia*. Accessed: Feb. 09, 2026. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10983/31240>
- [40] F. A. Pedraza Acevedo, M. P. Riveira Iguarán, and E. V. Velásquez Vega, "Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto hidráulico con reemplazo parcial de cemento por hueso bovino calcinado," Sep. 2017, Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5008>
- [41] E. Janowska-Renkas and A. Kaliciak, "Impact of Fly Ashes from Combustion in Fluidized Bed Boilers and Siliceous Fly Ashes on Durability of Mortars Exposed to Seawater and Carbonation Process," *Materials*, vol. 14, no. 9, p. 2345, May 2021, doi: 10.3390/ma14092345.
- [42] H. Affan, L. Fehr, G. Al-Massri, F. Alassaad, A. Yaghi, and H. Ghanem, "Strength, Transport Properties, and Life Cycle Impacts of Mortar Containing German Natural Pozzolan," *Infrastructures 2026, Vol. 11*, vol. 11, no. 2, Feb. 2026, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES11020067.

# ANEXOS

## Anexo 1

*Pesos de los huesos antes de la incineración*



## Anexo 2

*Pesos de la ceniza resultante de la incineración*



### Anexo 3

#### Caracterización de las cenizas



### Anexo 4

#### Cálculo de la densidad para cada tipo de ceniza.

<b>DATOS</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Pesos</b>			
	<b>450-2H</b>	<b>450-3H</b>	<b>600-2H</b>	<b>600-3H</b>
<b>Vacio</b>	417	418	418	418
<b>Con Agua</b>	1241	1242	1242	1242
<b>Agua + material</b>	1500	1447	1516	1547
<b>Charola</b>	497	607	485	354
<b>Charola+material (antes del horno)</b>	1572	1628	1573	1472
<b>Charola+material (después del horno)</b>	915	985	929	812
<b>CALCULOS</b>				
<b>Factor</b>	997.5	997.5	997.5	997.5
<b>Masa de la muestra seca al horno</b>	418	378	444	458
<b>Masa picnómetro lleno con agua</b>	1241	1242	1242	1242
<b>Masa picnómetro lleno con agua y material</b>	1500	1447	1516	1547
<b>Masa muestra SSS</b>	500	500	500	500
<b>RESULTADOS</b>				
<b>Densidad Relativa SH (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.73	1.28	1.96	2.35
<b>Densidad relativa SSS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.07	1.69	2.21	2.56
<b>Densidad Relativa Aparente SSS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.63	2.18	2.61	2.99
<b>Densidad SH (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1730.10	1278.15	1959.69	2342.85

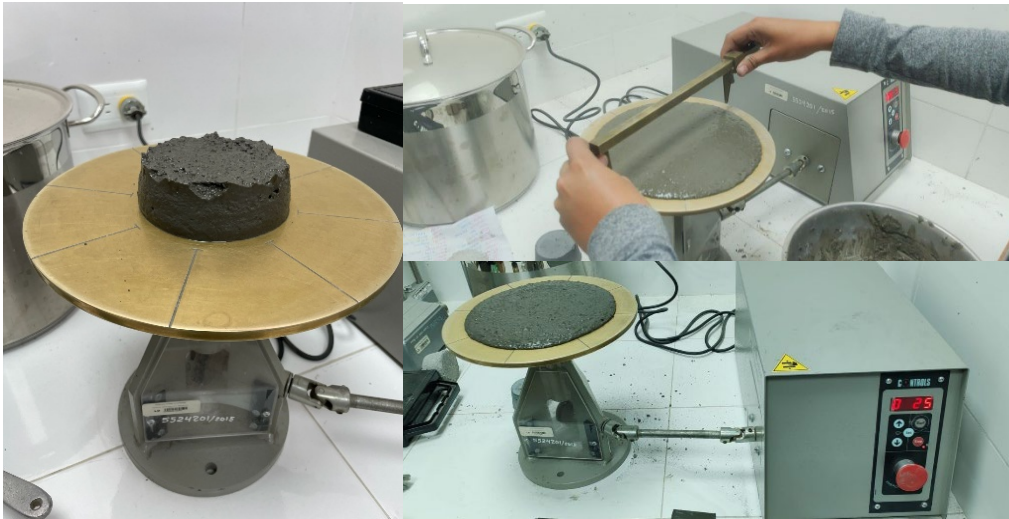
## Anexo 5

*Dosificaciones para elaborar un cubo de mortero.*

Elemento	Patrón	450 °C - 2 Horas - 10%	450 °C - 2 Horas - 5%	450 °C - 3 Horas - 10%	450 °C - 3 Horas - 5%	600 °C - 2 Horas - 10%	600 °C - 2 Horas - 5%	600 °C - 3 Horas - 10%	600 °C - 3 Horas - 5%
<b>Arena (g)</b>	<b>226.11</b>	226.11	226.11	226.11	226.11	226.11	226.11	226.11	226.11
<b>Cemento (g)</b>	<b>82.22</b>	74.00	78.11	74.00	78.11	74.00	78.11	74.00	78.11
<b>Agua (ml)</b>	<b>41.11</b>	41.11	41.11	44.85	41.11	39.24	37.37	41.11	39.06
<b>Ceniza (g)</b>	<b>0.00</b>	8.22	4.11	8.22	4.11	8.22	4.11	8.22	4.11
<b>a/c</b>	<b>0.50</b>	0.50	0.50	0.55	0.50	0.48	0.45	0.50	0.48

## Anexo 6

*Ensayo de fluidez del mortero en mesa de flujo*



## Anexo 7

*Cálculo de Fluidez para todos los tipos de dosificaciones.*

Muestra	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Fluidez (%)
<b>Patrón</b>	29.0	28.0	29.0	28.5	114.50
<b>450 °C - 2 Horas - 10%</b>	26.0	26.5	26.5	26.0	105.00
<b>450 °C - 2 Horas - 5%</b>	27.0	27.0	27.0	27.5	108.50
<b>450 °C - 3 Horas - 10%</b>	29.0	28.0	29.0	29.0	115.00
<b>450 °C - 3 Horas - 5%</b>	26.5	27.0	26.5	26.5	106.50
<b>600 °C - 2 Horas - 10%</b>	26.5	26.5	26.0	26.5	105.50
<b>600 °C - 2 Horas - 5%</b>	26.5	26.5	26.0	26.0	105.00
<b>600 °C - 3 Horas - 10%</b>	28.5	27.5	27.0	28.0	111.00
<b>600 °C - 3 Horas - 5%</b>	26.0	27.0	26.5	26.0	105.50

## Anexo 8

### Resultados de compresión a 7 días.

7 días								
Clasificación	Probeta N	Espesor	Anchura	Altura	Fuerza (kN)	Def max (%)	N/mm2	Promedio
<b>Patrón</b>	1	49.40	50.10	49.80	41.95	10.26	16.95	13.84
	2	49.70	50.50	50.80	29.94	3.66	11.93	
	3	49.70	50.10	50.10	31.48	3.30	12.64	
<b>450 °C - 2 Horas - 10%</b>	4	49.60	50.70	49.60	28.77	6.18	11.44	11.95
	5	49.40	50.30	49.90	29.26	4.67	11.77	
	6	49.60	50.30	49.20	31.50	3.58	12.63	
<b>450 °C - 2 Horas - 5%</b>	7	49.90	49.60	50.10	35.96	3.87	14.53	13.73
	8	49.75	49.30	50.10	31.47	4.68	12.83	
	9	49.90	49.80	49.90	34.34	4.34	13.82	
<b>450 °C - 3 Horas - 10%</b>	10	50.10	49.80	49.80	23.61	3.08	9.46	9.49
	11	49.70	49.60	50.00	22.12	3.99	8.97	
	12	49.30	51.00	50.40	25.23	3.96	10.03	
<b>450 °C - 3 Horas - 5%</b>	13	49.70	52.00	50.90	31.74	6.70	12.28	12.45
	14	50.50	50.60	50.80	31.89	3.72	12.48	
	15	50.40	50.00	50.30	31.75	4.10	12.60	
<b>600 °C - 2 Horas - 10%</b>	16	50.50	50.10	50.00	39.99	3.37	15.81	14.77
	17	50.50	50.80	50.30	37.94	3.09	14.79	
	18	49.80	51.00	50.50	34.84	2.79	13.72	
<b>600 °C - 2 Horas - 5%</b>	19	49.80	51.30	50.00	26.41	3.83	10.34	11.69
	20	50.60	51.10	49.80	33.26	3.04	12.86	
	21	50.00	50.80	50.30	30.12	2.49	11.86	
<b>600 °C - 3 Horas - 10%</b>	22	49.60	50.80	49.90	28.58	3.02	11.34	12.15
	23	49.90	50.90	50.10	31.53	2.71	12.41	
	24	49.90	51.40	50.30	32.56	2.55	12.69	
<b>600 °C - 3 Horas - 5%</b>	25	49.60	50.40	49.80	32.94	3.74	13.18	12.95
	26	49.70	50.20	49.90	29.48	4.06	11.82	
	27	49.70	51.20	50.50	35.22	2.39	13.84	

## Anexo 9

### Resultados de compresión a 14 días.

14 días								
Clasificación	Probeta N	Espesor	Anchura	Altura	Fuerza (kN)	Def max (%)	N/mm2	Promedio
<b>Patrón</b>	1	49.90	49.50	49.70	54.36	5.33	22.01	19.45
	2	49.80	50.50	50.30	46.93	3.63	18.66	
	3	50.00	49.20	49.60	43.51	4.31	17.69	
<b>450 °C - 2 Horas - 10%</b>	4	49.80	50.40	50.30	38.23	2.75	15.23	14.31
	5	49.90	50.40	50.60	33.64	2.90	13.38	
	6	50.00	50.60	50.80	36.24	2.72	14.33	
<b>450 °C - 2 Horas - 5%</b>	7	49.30	50.40	50.90	39.17	3.15	15.76	15.59
	8	50.00	49.90	50.40	40.06	4.17	16.06	
	9	49.80	50.40	50.90	37.48	3.12	14.93	
<b>450 °C - 3 Horas - 10%</b>	10	49.60	50.40	50.90	24.21	3.41	9.68	11.38
	11	49.20	51.20	51.30	31.73	3.68	12.60	
	12	49.60	49.50	49.70	29.09	4.76	11.85	
<b>450 °C - 3 Horas - 5%</b>	13	49.70	50.40	50.60	38.00	3.15	15.17	15.29
	14	49.60	50.80	51.00	40.79	3.03	16.19	
	15	49.40	50.80	51.00	36.39	3.29	14.50	
<b>600 °C - 2 Horas - 10%</b>	16	50.00	50.10	50.30	38.63	3.37	15.42	16.67
	17	49.60	50.30	50.30	42.38	2.67	16.99	
	18	49.60	50.60	50.60	44.18	2.32	17.60	
<b>600 °C - 2 Horas - 5%</b>	19	49.90	51.20	51.40	35.51	2.97	13.90	14.21
	20	50.00	51.00	51.40	38.93	4.13	15.26	
	21	49.80	50.60	50.80	33.90	3.11	13.45	
<b>600 °C - 3 Horas - 10%</b>	22	50.00	50.80	50.60	38.79	5.21	15.27	14.29
	23	49.80	51.20	51.40	36.59	3.34	14.35	
	24	49.60	50.00	50.90	32.84	3.88	13.24	
<b>600 °C - 3 Horas - 5%</b>	25	50.00	50.90	50.80	43.26	3.03	17.00	16.01
	26	49.90	51.00	50.80	38.70	3.22	15.21	
	27	49.80	51.40	51.20	40.53	4.42	15.83	



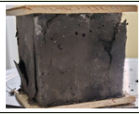

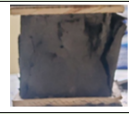


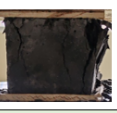

















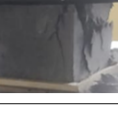
## Anexo 10

### Resultados de compresión a 28 días.

28 días								
Clasificación	Probeta N	Espesor	Anchura	Altura	Fuerza (kN)	Def max (%)	N/mm2	Promedio
<b>Patrón</b>	1	50.20	50.90	50.80	59.00	4.62	23.09	22.22
	2	49.90	49.60	49.70	55.99	3.69	22.62	
	3	49.90	49.90	50.00	52.16	3.10	20.95	
<b>450 °C - 2 Horas - 10%</b>	4	49.70	49.90	50.30	48.45	2.76	19.53	19.26
	5	49.50	49.10	49.40	49.50	3.10	20.37	
	6	49.60	49.80	49.80	44.16	3.18	17.88	
<b>450 °C - 2 Horas - 5%</b>	7	49.30	49.40	49.10	48.40	3.70	19.87	20.45
	8	49.20	50.10	50.70	50.65	2.97	20.55	
	9	49.50	49.70	50.30	51.49	3.07	20.93	
<b>450 °C - 3 Horas - 10%</b>	10	49.80	49.60	49.90	40.73	2.38	16.49	16.52
	11	49.60	49.70	50.10	42.90	2.21	17.40	
	12	49.60	49.30	49.90	38.31	2.72	15.67	
<b>450 °C - 3 Horas - 5%</b>	13	49.50	49.70	49.70	54.04	2.59	21.97	21.10
	14	49.70	49.80	49.90	55.61	2.72	22.47	
	15	49.40	50.00	50.20	46.58	2.53	18.86	
<b>600 °C - 2 Horas - 10%</b>	16	49.40	49.80	50.10	58.53	2.40	23.79	21.83
	17	49.40	50.40	49.20	52.36	2.57	21.03	
	18	49.00	49.60	49.40	50.21	3.62	20.66	
<b>600 °C - 2 Horas - 5%</b>	19	49.20	50.90	50.80	48.87	2.59	19.51	19.85
	20	49.50	50.60	49.70	50.64	2.78	20.22	
	21	49.30	50.70	51.00	49.53	2.50	19.82	
<b>600 °C - 3 Horas - 10%</b>	22	49.70	50.50	50.90	50.20	2.58	20.00	19.12
	23	49.80	50.70	50.50	47.64	3.48	18.87	
	24	49.80	50.40	50.90	46.38	2.86	18.48	
<b>600 °C - 3 Horas - 5%</b>	25	49.80	51.70	51.60	47.72	2.40	18.53	19.79
	26	49.80	50.90	51.00	51.10	2.69	20.16	
	27	49.70	50.30	50.50	51.67	2.20	20.67	

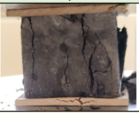








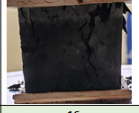
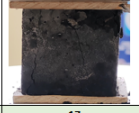

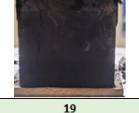
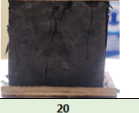





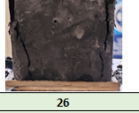
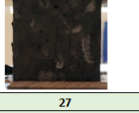






## Anexo 11

### *Fallas de compresión a 7 días.*

1 Falla trapecoidal	2 Falla piramidal	3 Falla trapecoidal	4 Falla trapecoidal	5 Falla trapecoidal	6 Falla trapecoidal
					
7 Falla piramidal	8 Falla trapecoidal	9 Falla trapecoidal	10 Falla trapecoidal	11 Falla piramidal	12 Falla trapecoidal
					
13 Falla piramidal	14 Falla trapecoidal	15 Falla piramidal	16 Falla trapecoidal	17 Falla trapecoidal	18 Falla trapecoidal
					
19 Falla trapecoidal	20 Falla trapecoidal	21 Falla piramidal	22 Falla trapecoidal	23 Falla trapecoidal	24 Falla trapecoidal
					
25 Falla trapecoidal	26 Falla trapecoidal	27 Falla trapecoidal			
					

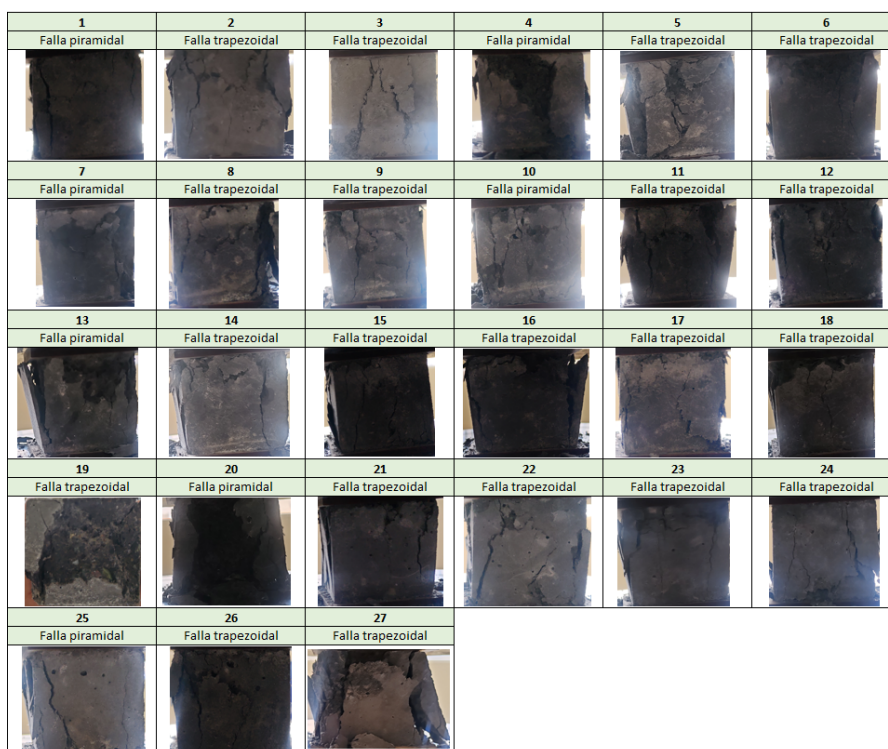
## Anexo 12

### *Fallas de compresión a 14 días.*

1 Falla trapecoidal	2 Falla trapecoidal	3 Falla piramidal	4 Falla trapecoidal	5 Falla piramidal	6 Falla trapecoidal
					
7 Falla piramidal	8 Falla trapecoidal	9 Falla piramidal	10 Falla trapecoidal	11 Falla trapecoidal	12 Falla trapecoidal
					
13 Falla trapecoidal	14 Falla trapecoidal	15 Falla trapecoidal	16 Falla trapecoidal	17 Falla trapecoidal	18 Falla trapecoidal
					
19 Falla trapecoidal	20 Falla trapecoidal	21 Falla trapecoidal	22 Falla trapecoidal	23 Falla trapecoidal	24 Falla trapecoidal
					
25 Falla trapecoidal	26 Falla trapecoidal	27 Falla trapecoidal			
					

## Anexo 13

### *Fallas de compresión a 28 días.*



## Anexo 14

*Medidas de las vigas ensayadas en mm*

Probetas	7 días			14 días			28 días		
	L	B	H	L	B	H	L	B	H
1	159	39.8	41.9	160.1	41.94	40.24	160.7	39.25	42.32
2	159.8	41	40.7	159	40.01	41.01	160.07	41.11	40.28
3	160.9	40	42.9	160.8	40.52	40.82	161.16	42.26	39.88
4	158.9	40.6	40.3	158.9	40.8	39.91	159.56	41.58	40.18
5	159.8	40.1	40.5	158.8	40.3	39.95	159.72	39.88	42.5
6	159.1	39.8	39.7	159.4	41.52	39.71	160.4	40.23	39.58

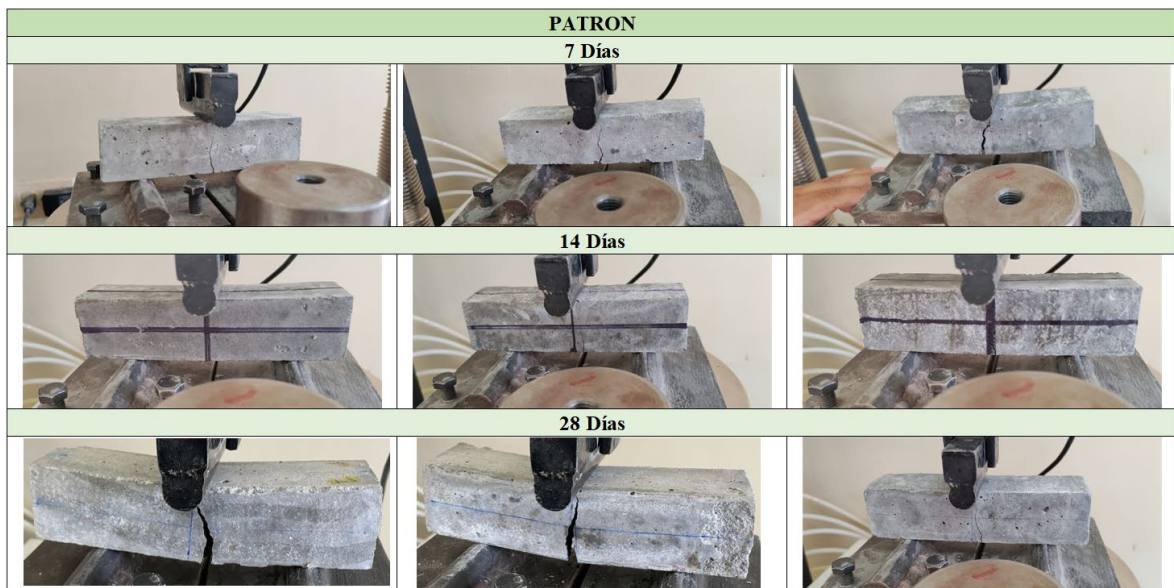
## Anexo 15

*Cálculo de la densidad del mortero*

Probeta	No.	Pesos (g)			Volumen (cm <sup>3</sup> )			Densidad (g/cm <sup>3</sup> )			Promedio
		7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días	
Patrón	1	592	583	593	265.15	270.20	266.93	2.23	2.16	2.22	2.2061
	2	589	575	598	266.66	260.89	265.06	2.21	2.20	2.26	
	3	601	580	602	276.10	265.97	271.61	2.18	2.18	2.22	
600 2H	4	573	571	576	259.99	258.74	266.57	2.20	2.21	2.16	2.2062
	5	568	566	571	259.52	255.67	270.71	2.19	2.21	2.11	
	6	558	576	603	251.39	262.81	255.41	2.22	2.19	2.36	

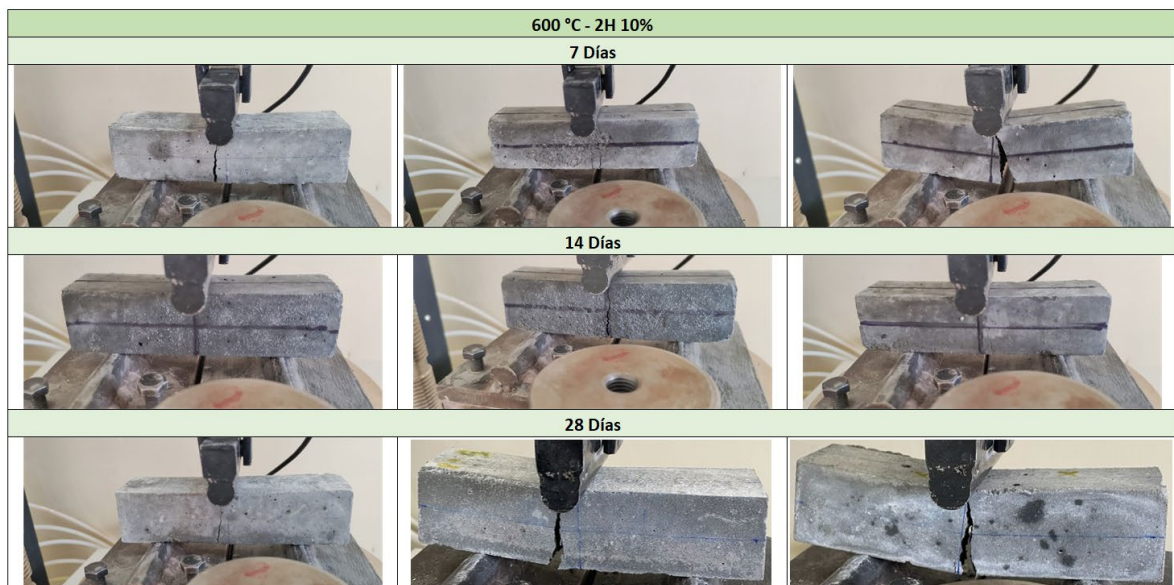
## Anexo 16

*Fallas a flexión de la muestra Patrón a 7, 14 y 28 días.*



### Anexo 17

*Fallas a flexión de la mejor dosificación en compresión a 7, 14 y 28 días.*



## Anexo 18

*Cálculo del coeficiente de correlación de Spearman (Temperatura-Resistencia)*

Tipo	Temperatura	Resistencia	Rango (x)	Rango (y)	d	d2
1	450	19.26	2.5	3	0.5	0.25
2	450	20.45	2.5	6	3.5	12.25
3	450	16.52	2.5	1	-1.5	2.25
4	450	21.10	2.5	7	4.5	20.25
5	600	21.83	6.5	8	1.5	2.25
6	600	19.85	6.5	5	-1.5	2.25
7	600	19.12	6.5	2	-4.5	20.25
8	600	19.79	6.5	4	-2.5	6.25
<b>Σ d2</b>						66
<b>n</b>						8
<b>ρ</b>						0.2143

## Anexo 19

*Cálculo del coeficiente de correlación de Spearman (Horas de calcinación-Resistencia)*

Tipo	Horas	Resistencia	Rango (x)	Rango (y)	d	d2
1	2	19.26	2.5	3	0.5	0.25
2	2	20.45	2.5	6	3.5	12.25
3	3	16.52	6.5	1	-5.5	30.25
4	3	21.10	6.5	7	0.5	0.25
5	2	21.83	2.5	8	5.5	30.25
6	2	19.85	2.5	5	2.5	6.25
7	3	19.12	6.5	2	-4.5	20.25
8	3	19.79	6.5	4	-2.5	6.25
<b>Σ d2</b>						106
<b>n</b>						8
<b>ρ</b>						-0.2619

## Anexo 20

*Cálculo del coeficiente de correlación de Spearman (% de reemplazo-Resistencia)*

<b>Tipo</b>	<b>%</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Rango (x)</b>	<b>Rango (y)</b>	<b>d</b>	<b>d<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	<b>10</b>	<b>19.26</b>	6.5	3	-3.5	12.25
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>20.45</b>	2.5	6	3.5	12.25
<b>3</b>	<b>10</b>	<b>16.52</b>	6.5	1	-5.5	30.25
<b>4</b>	<b>5</b>	<b>21.10</b>	2.5	7	4.5	20.25
<b>5</b>	<b>10</b>	<b>21.83</b>	6.5	8	1.5	2.25
<b>6</b>	<b>5</b>	<b>19.85</b>	2.5	5	2.5	6.25
<b>7</b>	<b>10</b>	<b>19.12</b>	6.5	2	-4.5	20.25
<b>8</b>	<b>5</b>	<b>19.79</b>	2.5	4	1.5	2.25
<b>Σ d<sup>2</sup></b>						<b>106</b>
<b>n</b>						<b>8</b>
<b>ρ</b>						<b>-0.2619</b>