

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON TEJIDO ÓSEO BOVINO, COMO  
SUSTITUTO PROPORCIONAL DEL CEMENTO Y DEL AGREGADO GRUESO**

Luis Carlos Sarmiento Rodríguez, Kevin David Marroquín Ayala, Fabian Camilo Ayala Rojas



Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería

Universidad La Gran Colombia

Ciudad

2025

**Análisis de la resistencia a compresión del concreto con tejido óseo bovino, como sustituto  
proporcional del cemento y del agregado grueso**

**Luis Carlos Sarmiento Rodríguez, Kevin David Marroquín Ayala, Fabian Camilo Ayala Rojas**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Profesor: Jaime Iván Mora Samacá**

**Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería**



**Universidad La Gran Colombia**

**Ciudad**

**2025**

### **Agradecimientos**

Queremos agradecer en primer lugar a nuestro tutor de la investigación, Ing. Jaime Iván Mora Samacá, ya que con su paciencia, apoyo contante y conocimiento infinito fue fundamental para la realización de este trabajo, proporcionándonos motivación y confianza en el proceso llevado a cabo.

A nuestras familias por su apoyo y amor incondicional y constante durante toda la carrera, siendo esto uno de los factores más importante que no permitieron que desvaneciéramos y hoy estamos a un paso de cumplir un logro más.

A la Universidad la Gran Colombia gracias por brindarnos la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Nuestra gratitud también va al Laboratorio de Ingeniería Civil y a José Rozo cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de este trabajo.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>16</b>
MARCO DE ANTECEDENTES.....	16
MARCO TEÓRICO.....	17
<i>Concreto y sus componentes .....</i>	<i>17</i>
<i>Cemento.....</i>	<i>17</i>
<i>Agua.....</i>	<i>17</i>
<i>Composición química y propiedades mecánicas.....</i>	<i>18</i>
<i>Calcinación del hueso bovino.....</i>	<i>18</i>
<i>Diseño de mezclas según ACI 318.....</i>	<i>19</i>
<i>Resistencia a la compresión del concreto.....</i>	<i>19</i>
MARCO LEGAL .....	19
<i>Referencias Normativas.....</i>	<i>19</i>
<b>ASPECTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>21</b>
CAPÍTULO I (PROCESO DE ALISTAMIENTO Y PURIFICACIÓN DEL HUESO) .....	21
<i>Análisis de la composición y estructura del hueso.....</i>	<i>21</i>
<i>Recolección y selección inicial del hueso bovino.....</i>	<i>21</i>
CAPÍTULO II (SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES).....	23
CAPITULO III ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL HUESO TRITURADO .....	29

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON TEJIDO ÓSEO BOVINO	5
<i>Metodología para la purificación del hueso</i> .....	29
<i>Metodología de calcinación para obtener sustituto de cemento</i> .....	30
<i>Metodología de trituración para ser usado como sustituto del agregado grueso</i> .....	30
<i>Metodología para el diseño de mezcla base</i> .....	31
CAPÍTULO IV (ELABORACIÓN, CURADO Y FALLO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO) .....	34
<i>Metodología para el diseño de mezcla modificada</i> .....	34
<i>Ejecución de probetas curado</i> .....	35
<b>ANÁLISIS CUANTITATIVO DE FALLAS A COMPRESIÓN</b> .....	<b>38</b>
<b>ANÁLISIS CUALITATIVO DE FALLAS A COMPRESIÓN</b> .....	<b>40</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>43</b>
CONCLUSIONES .....	43
RECOMENDACIONES .....	44
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>466</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>49</b>

**Lista de Figuras**

**Figura 1** *Detalle de hueso bovino*

**Figura 2** *Curva granulométrica*

**Figura 3** *Resistencia a la compresión*

**Figura 4** *Inspección visual de la adherencia de los agregados*

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b>	<b>Desgaste máquina de los ángeles</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 2</b>	<b>Equivalente de arena de suelos y agregados finos</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 3</b>	<b>Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos (inv e-213-13)</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>Determinación de la cantidad de material</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Determinación del contenido de agua</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 6</b>	<b>Densidad, gravedad específica y absorción</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 7</b>	<b>Densidad Bulk</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 8</b>	<b>Determinación de la resistencia del agregado grueso</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 9</b>	<b>Caracterización de los componentes del concreto</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 10</b>	<b>Relación agua-cemento</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 11</b>	<b>Corrección por humedad</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 12</b>	<b>Diseño de mezcla concreto base</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 13</b>	<b>Diseño de mezcla de concreto con adición de hueso</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 14</b>	<b>Resistencia a compresión obtenida del concreto base</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 15</b>	<b>Resistencia a compresión obtenida del concreto modificado</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 16</b>	<b>Cuadro comparativo resultados de laboratorio</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 17</b>	<b>Tipos de fallas en cilindro</b>	<b>41</b>

### Glosario

**ACI 318:** Norma del American Concrete Institute que establece los requisitos para el diseño y construcción de estructuras de concreto reforzados, utilizada como referencia en el diseño de mezclas de concreto. (ACI, 2019)

**Absorción:** Capacidad de un material para retener agua dentro de sus poros, expresada como porcentaje respecto a su peso seco.

**Agregado fino:** Material granular, generalmente arena natural o triturada, que pasa por el tamiz N°4 (4,75 mm) y se usa en la fabricación del concreto para llenar los vacíos entre los agregados gruesos. (Matallana, 2023)

**Agregado grueso:** Material pétreo de mayor tamaño, como grava o piedra triturada, que proporciona resistencia y estabilidad a la mezcla de concreto. (Matallana, 2023)

**Calcinación:** Proceso térmico mediante el cual se somete un material a altas temperaturas (por encima de 600 °C) para eliminar componentes orgánicos o volátiles, obteniendo un residuo mineral estable. En este caso, aplicado al hueso bovino. (Matallana, 2023)

**Capacidad portante:** propiedad del concreto que define su resistencia para soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas o fallas estructurales.

**Cemento Portland:** es un polvo hidráulico hecho principalmente de silicatos de calcio que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece por reacciones químicas, provocando la unión resistente entre los agregados en concretos y morteros.

**Diáfisis:** Parte central o cuerpo de los huesos largos; proporciona rigidez estructural y resistencia mecánica. (Alvis, 2020)

**Hidroxiapatita:** Mineral natural de los huesos, compuesto principalmente por fosfato de calcio  $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ , que le otorga dureza y resistencia al tejido óseo. (Alvis, 2020)

**Hipoclorito de sodio (NaClO):** solución oxidante que libera cloro activo; actúa como desinfectante y agente blanqueador al oxidar y degradar materia orgánica y microorganismos durante procesos de limpieza y purificación del hueso bovino.

**Hueso bovino calcinado:** material inorgánico resultante de someter huesos de res a altas temperaturas para eliminar la materia orgánica; queda una estructura mayormente mineral con actividad puzolánica que reacciona con hidróxido de calcio del cemento.

**Máquina de Los Ángeles:** Equipo de laboratorio constituido por un tambor rotatorio en el que se introducen áridos y esferas de acero; al rotar el conjunto, las partículas chocan y se desgastan, permitiendo cuantificar la pérdida de masa y así evaluar la resistencia a la abrasión o desgaste de los agregados gruesos.

**Módulo de finura:** es un número que resume la granulometría de un agregado fino; se obtiene sumando los porcentajes acumulados retenidos en una serie de mallas estándar y dividiendo el total por 100, y refleja el grosor medio de las partículas granulométricas.

**Puzolánico (material):** Material silíceo o aluminosilíceo que, en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por los cementos hidráulicos para formar silicatos y aluminatos hidratados con propiedades cementantes.

**Relación agua/cemento (a/c):** es la fracción entre la masa del agua añadida y la masa del cemento en una mezcla; controla la hidratación del cemento y determina la porosidad final del mortero o concreto, influyendo directamente en su resistencia y durabilidad.

**Resistencia a la compresión:** Capacidad del concreto (o material) para soportar cargas axiales que tienden a reducir su longitud o volumen; se determina mediante ensayos estándar aplicando carga hasta la falla y se expresa en megapascuales (MPa).

**Tamiz:** Instrumento de laboratorio con mallas de diferentes aberturas usado para clasificar las partículas de los agregados según su tamaño.

**Tejido óseo:** Material biológico que forma los huesos; está compuesto por células, fibras de colágeno y minerales como fosfato y carbonato de calcio.

**Trituración:** Proceso mecánico mediante el cual se reduce el tamaño de las partículas sólidas, en este caso del hueso bovino, hasta alcanzar dimensiones adecuadas para su uso como agregado.

**Trabajabilidad:** F capacidad de una mezcla de concreto para fluir, deformarse y acomodarse con la energía aplicada durante el amasado, transporte, colocación y compactación, manteniendo su homogeneidad y resistiendo la segregación.

## RESUMEN

A lo largo de la historia la construcción ha experimentado una constante evolución en el uso y combinación de materiales, con el fin de mejorar su desempeño y durabilidad. Sin embargo, en los últimos años ha cobrado relevancia el impacto ambiental, lo que supone un reto de reemplazar materiales convencionales por alternativas más sostenibles. En este contexto, la presente propuesta busca mitigar tanto los efectos ambientales como los socioeconómicos asociados al sector de la construcción mediante la reutilización de residuos sólidos, específicamente hueso bovino. Este subproducto, al contener compuestos como carbonato de calcio y fosfato de calcio, presenta compatibilidad con la composición química del cemento, lo que lo convierte en un potencial sustituto.

El sacrificio de ganado bovino no recibe un aprovechamiento adecuado dentro de la industria. Incorporación de tejido óseo bovino como sustituto proporcional tanto del cemento como del agregado grueso. Esta propuesta surge de la necesidad de aprovechar de manera sostenible los residuos generados en el sacrificio animal, los huesos de bovino (fémur), los cuales suelen ser desechados sin un uso adecuado. Mediante un proceso de calcinación y transformación, el hueso bovino adquiere características puzolánicas que lo hacen apto para integrarse en la mezcla de concreto. El estudio experimental evalúa cómo esta sustitución influye en las propiedades mecánicas, en particular la resistencia a la compresión, la capacidad portante y el desempeño estructural del concreto aligerado frente a un concreto convencional. Asimismo, busca determinar si la aplicación de este material alternativo puede generar beneficios en términos de reducción de peso, optimización del comportamiento mecánico y sostenibilidad ambiental.

*Palabras clave: sostenibilidad, concreto hidráulico, hueso bovino, agregado grueso, capacidad portante.*

**ABSTRACT**

Throughout history, construction has undergone a constant evolution in the use and combination of materials in order to improve performance and durability. However, in recent years, environmental impact has gained significant importance, posing a challenge to replace conventional materials with more sustainable alternatives. In this context, the present proposal aims to mitigate both the environmental and socioeconomic effects associated with the construction sector through the reuse of solid waste, specifically bovine bone. This by-product, which contains compounds such as calcium carbonate and calcium phosphate, shows compatibility with the chemical composition of cement, making it a potential substitute.

The slaughter of cattle does not receive adequate utilization within the industry. This research proposes the incorporation of bovine bone tissue as a proportional substitute for both cement and coarse aggregate. The proposal arises from the need to sustainably utilize the waste generated from animal slaughter—specifically bovine bones (femurs)—which are often discarded without proper use. Through a calcination and transformation process, bovine bone acquires pozzolanic characteristics that make it suitable for integration into concrete mixtures.

The experimental study evaluates how this substitution influences the mechanical properties, particularly compressive strength, load-bearing capacity, and structural performance of lightweight concrete compared to conventional concrete. Likewise, it seeks to determine whether the application of this alternative material can generate benefits in terms of weight reduction, optimization of mechanical behavior, and environmental sustainability.

*Keywords: sustainability, hydraulic concrete, bovine bone, coarse aggregate, load-bearing capacity.*

## INTRODUCCIÓN

En Colombia existen numerosas plantas de sacrificio animal que generan diversos residuos óseos, los cuales podrían emplearse como insumo en la producción de concreto junto con cemento, agua y agregados. Según datos del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), el país cuenta con aproximadamente 1.611 plantas, de las cuales cerca de 900 se dedican al procesamiento de bovinos (Pedraza et al., 2017).

El hueso bovino, considerado un subproducto secundario respecto a la carne y la piel, se ha catalogado como un desecho en la industria ganadera (Ardila & Echeverry, 2018). Frente a esta situación, la presente investigación se enfoca en analizar el comportamiento del hueso bovino calcinado al interactuar con el cemento, con el fin de evaluar su potencial como material puzolánico para la elaboración de un concreto hidráulico. La propuesta plantea reemplazar parcialmente el cemento para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, especialmente su capacidad portante, con el objetivo de obtener un material más resistente que el concreto convencional (Sánchez, 2006).

### **JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación modifica la dosificación del concreto convencional, incorporando hueso de res como agregado parcial, con el objetivo de reemplazar una fracción del agregado tradicional extraído de canteras o depósitos aluviales. Esta investigación permitirá demostrar que sustituyendo el material agregado en unas porciones ya establecidas en un 10%, se puede obtener una reducción del impacto ambiental y económico para la consecución de este material (concreto), así como la utilización de este mismo para proyectos de construcción.

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el comportamiento del concreto convencional modificado mediante la inclusión de hueso bovino triturado como agregado grueso y la sustitución del 10% del cemento por hueso bovino calcinado, realizando el diseño de la mezcla conforme a los parámetros establecidos por la norma ACI 318.

### **Objetivos Específicos**

- Obtener, purificar y triturar el hueso bovino para su adecuada caracterización como materia prima, con el propósito de emplearlo en el diseño de las mezclas de concreto modificado.
- Determinar y analizar el diseño de mezcla óptimo del concreto modificado con hueso bovino triturado y calcinado, conforme a la norma ACI 318, evaluando su comportamiento mecánico a compresión en diferentes periodos de curado (7, 14, 28, 35 y 42 días) frente a un concreto convencional.
- Identificar las ventajas y desventajas derivadas de la implementación del hueso bovino como nuevo agregado en la mezcla de concreto convencional, mediante la evaluación práctica de su comportamiento y desempeño mecánico.

## MARCO REFERENCIAL

### Marco de antecedentes

El uso de residuos orgánicos en la industria de la construcción ha crecido en las últimas décadas, enfocándose en desarrollar materiales más sostenibles y con menor impacto ambiental (Angulo, 2018). En este contexto, el uso de tejido óseo bovino como material alternativo ha sido explorado principalmente en la producción de fertilizantes, alimentos para animales y productos agroindustriales; no obstante, su incorporación en mezclas de concreto ha sido poco estudiada, lo que representa una oportunidad para investigar su comportamiento como sustituto parcial del cemento y del agregado grueso.

Diversas investigaciones han establecido que los huesos bovinos presentan una composición mineral rica en hidroxiapatita, un fosfato cálcico cristalino que aporta elevada resistencia mecánica y estabilidad térmica (Ross, 2007). Estas características han motivado su empleo experimental como componente en materiales compuestos y en procesos con fines industriales y ambientales.

En el ámbito productivo colombiano, la ciudad de Bogotá cuenta con plantas de sacrificio que generan grandes volúmenes de residuos óseos. En el matadero San Martín, por ejemplo, se reporta un promedio diario de 600 reses sacrificadas, lo que equivale a aproximadamente 15.000 kilogramos de hueso bovino al día, mientras que en el matadero Guadalupe se sacrifican cerca de 575 reses diarias (Pedraza, 2017). Esta disponibilidad convierte al hueso bovino en un residuo abundante, económico y subutilizado, empleado principalmente para purinas, abonos y productos alimenticios.

El uso del hueso bovino calcinado también ha sido estudiado como material puzolánico. (Somma de Feré, 2004), demostraron que la calcinación del hueso bovino a temperaturas superiores a 600 °C permite eliminar la materia orgánica, transformando la estructura física y química del material y potenciando su reactividad. Asimismo (Tobón, 2000) señala que la calcinación entre 600 °C y 1200 °C

induce cambios cristalográficos que favorecen su comportamiento como adición cementante. La calcinación a 900 °C, como se plantea en esta investigación, constituye un punto intermedio adecuado para obtener un material con propiedades cementantes apreciables.

A pesar de estos aportes, aún existen vacíos significativos sobre el comportamiento mecánico del concreto modificado con hueso bovino calcinado y triturado. Por ello, la investigación evalúa el comportamiento del material, con especial énfasis en su resistencia a la compresión, siguiendo los criterios y requisitos de diseño y verificación que establece la norma ACI 318 (ACI, 2019).

## **Marco teórico**

### **Concreto y sus componentes**

El concreto es un material compuesto por cemento, agua, agregados finos y gruesos, además de aire atrapado y, en ocasiones, aditivos o adiciones minerales. Su comportamiento mecánico y durabilidad dependen de la calidad, proporción y características de cada uno de sus componentes (Sánchez, 2006).

### **Cemento**

El cemento Portland es un polvo que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece tanto en contacto con el aire como bajo el agua (Martínez, 1998). Según el USBR (1987), existen cinco tipos de cemento Portland, cada uno diseñado para condiciones específicas de durabilidad, resistencia o generación de calor de hidratación.

### **Agua**

El agua de mezclado debe ser limpia y no contener materia orgánica, sales ni sustancias que puedan alterar la hidratación del cemento (Sánchez, 2006).

### **Composición química y propiedades mecánicas**

El hueso seco está constituido por un 60–70 % de hidroxapatita, responsable del 99 % del calcio y el 80 % del fósforo presentes en su estructura (Ross, 2007). Esta composición le confiere resistencias a compresión que oscilan entre 107,5 y 150 MPa (Mendoza, 1998). El 40 % restante corresponde a agua (10–20 %) y colágeno ( $\approx 30$  %), componente que aporta tenacidad y resistencia a tracción (Silverstein, 2011). Su porosidad, estimada entre 5 % y 30 %, determina su desempeño mecánico y su capacidad de interacción con otros materiales (Caeiro, 2013).

### **Calcinación del hueso bovino**

La calcinación es un proceso térmico mediante el cual el hueso se somete a temperaturas superiores a 600 °C para eliminar materia orgánica y obtener un material mineralizado (Somma de Feré, 2004). Entre 600 °C y 1200 °C, la estructura cristalina se modifica, aumentando la reactividad del producto final (Tobón, 2000). En este trabajo se emplea una calcinación a 900 °C por su equilibrio entre reactividad y estabilidad mineral.

### **Hueso bovino calcinado como material puzolánico**

Los materiales puzolánicos reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando compuestos cementantes secundarios que contribuyen al cierre de poros y a la mejora de la durabilidad del concreto (Tobón, 2000). En este contexto, la calcinación del hueso bovino se plantea como un tratamiento térmico controlado análogo al proceso de clinkerización, cuyo objetivo es modificar su estructura química y mineralógica, favoreciendo la formación de fases reactivas ricas en fosfatos de calcio. Al ser posteriormente molido de manera fina, el hueso bovino calcinado puede presentar un comportamiento similar al de otras puzolanas naturales, actuando como material suplementario del cemento y contribuyendo al desempeño mecánico del concreto.

### **Diseño de mezclas según ACI 318**

La norma ACI 318 establece los requisitos para el diseño estructural de elementos en concreto, incluyendo parámetros para mezclas con materiales convencionales y no convencionales. Los reemplazos parciales deben evaluarse mediante ensayos de resistencia y durabilidad, verificando que no se comprometan las exigencias estructurales del proyecto (ACI, 2019).

### **Resistencia a la compresión del concreto**

La resistencia a la compresión mide cuánto puede soportar el concreto antes de romperse bajo cargas; es el parámetro más usado para evaluar su desempeño y está influida por la relación agua/cemento, la naturaleza y tamaño de los agregados, la compactación y el curado (Sánchez, 2006). En concretos modificados con materiales alternativos, estas propiedades pueden variar significativamente, por lo que su estudio debe ser comparativo y experimental.

### **Marco legal**

El marco para la creación y control de calidad del concreto hidráulico en Colombia se fundamenta en un conjunto de normas técnicas emitidas por el Instituto Nacional de Vías (INV) y el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), que define los procedimientos de ensayo para sus componentes y propiedades. A continuación, se presenta un listado de las normas citadas, redactado en formato APA Séptima Edición, que constituyen una referencia clave en este ámbito.

### **Referencias Normativas**

Las siguientes normas son esenciales para la especificación y el control de calidad de los materiales y del producto final en proyectos de infraestructura que involucren concreto hidráulico, especialmente en la construcción vial.

- Instituto Nacional de Vías (INV), (2013). Ensayo: Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INV E-230-13). Esta norma es fundamental para evaluar la forma geométrica de los agregados (piedras y gravas) que se usarán en la mezcla. La forma influye directamente en la trabajabilidad del concreto y en su resistencia a la segregación y al esfuerzo.
- Instituto Nacional de Vías (INV). (2013). Ensayo: Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E-213-13). Establece el método para determinar la distribución del tamaño de partícula (granulometría) de los agregados. Una granulometría adecuada es crucial para minimizar los vacíos dentro de la mezcla, optimizar el uso de cemento y garantizar la densidad y durabilidad del concreto.
- Norma Técnica Colombiana (NTC). (1995). El método de la (NTC 176) especifica cómo medir la densidad y la absorción de agua del agregado grueso. Esos valores cuantifican cuánto pesa realmente el árido y cuánto agua puede retener, información imprescindible para calcular correctamente las proporciones de la mezcla.
- Norma Técnica Colombiana (NTC). (1995). El método de la (NTC 221) describe el procedimiento estándar para medir la densidad del cemento hidráulico. Este ensayo cuantifica la masa por unidad de volumen del cemento, dato que permite convertir con precisión las proporciones de diseño entre masa y volumen y garantizar una dosificación correcta del aglutinante.
- Norma Técnica Colombiana (NTC). (2021). El método de la (NTC 396) describe la prueba del cono de Abrams para medir el asentamiento (slump) del concreto fresco. El ensayo cuantifica la consistencia o fluidez de la mezcla y entrega un valor de asentamiento que refleja su trabajabilidad en el momento de la colocación.

## ASPECTOS METODOLÓGICOS

### Capítulo I (Proceso de alistamiento y purificación del hueso).

#### **Análisis de la composición y estructura del hueso.**

La composición de los huesos está conformada por células que dan lugar a tejidos óseos y minerales, se clasifican en tres tipos:

**Sustancia Osteoide:** es la matriz orgánica recién formada del hueso que aún no se ha mineralizado; está compuesta principalmente por colágeno y una mezcla de proteínas del espacio extracelular.

**Minerales:** El calcio y el fosfato se combinan para formar cristales de hidroxapatita que se depositan sobre la sustancia osteoide, mineralizándola y transformándola en tejido óseo más duro y resistente.

**Células:** En el tejido óseo hay dos tipos celulares con funciones opuestas: los osteoblastos, que sintetizan la sustancia osteoide y generan nuevo hueso; y los osteoclastos, que degradan el hueso mineralizado para reabsorber sus componentes.

**Estructura del hueso:** se organiza en tres porciones o capas principales: la diáfisis, que es la parte larga y central del cuerpo del hueso; las epífisis, que son los extremos donde suelen articularse con otros huesos; y la metáfisis, la zona intermedia entre diáfisis y epífisis donde ocurre el crecimiento en los huesos largos.

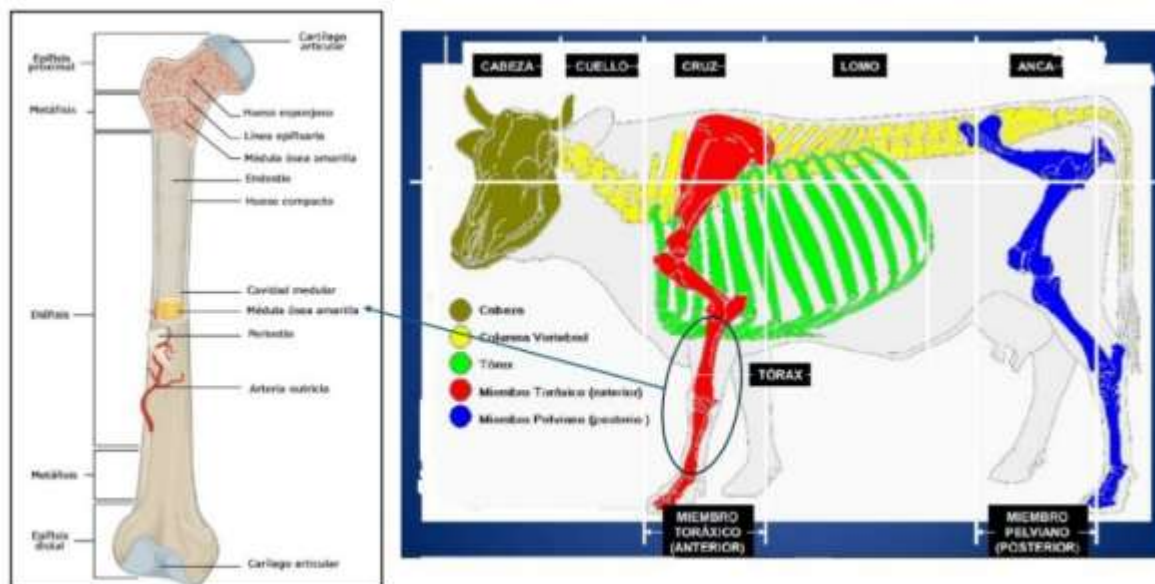
#### **Recolección y selección inicial del hueso bovino.**

Para la selección del material se realizó un análisis de la conformación ósea de los bovinos donde se pudo identificar lo siguiente.

En el primer análisis se pudo determinar que la sección de la cruz del animal más puntualmente en el miembro torácico (anterior), los cuales están compuestos por huesos largos, estos se caracterizan como lo dice su nombre por poseer una longitud predominante a la anchura y al espesor, y sus huesos densos, fuertes. (Alvis, 2020).

### Figura 1

*Estructura anatómica del hueso largo y localización de los principales segmentos óseos del esqueleto bovino*



Nota: Tomado de “Instituto idema Arequipa. Sistema óseo de vacunos, metacarpo” por J. Alvis 2020.

- El hueso utilizado para este proyecto de investigación fue el metacarpo ya que cuenta con una estructura ósea fuerte y muy bien conformada.
- Una vez seleccionado el hueso, se realizó la adquisición de 25 kg de hueso bovino en un frigorífico autorizado. Posteriormente, se inició el alistamiento de los elementos y herramientas necesarias para el proceso de limpieza y retiro de los tejidos orgánicos adheridos al hueso, empleando agua caliente, lo cual facilitó la remoción inicial del material orgánico. Las evidencias fotográficas de esta etapa se presentan en el Anexo 1 y 2.

- Finalizada la limpieza preliminar, y tras el retiro parcial del material orgánico, el hueso fue sometido a un proceso de reducción de tamaño mediante el uso de herramientas manuales, como martillos, con el fin de obtener fragmentos con dimensiones aproximadas entre 5 y 8 cm de longitud. Este procedimiento permitió realizar una primera clasificación del material por tamaños nominales. El registro fotográfico correspondiente a esta etapa se encuentra en el Anexo 3.
- Para culminar el proceso de purificación del hueso, los fragmentos obtenidos fueron sumergidos en una solución de hipoclorito de sodio al 5,25 % durante un periodo de 15 a 20 minutos, lo que permitió la eliminación total del material orgánico residual. Las evidencias fotográficas de este procedimiento se presentan en el Anexo 4.

## **Capítulo II (Selección y caracterización de materiales).**

Para la elaboración de las muestras tanto de concreto base como el concreto adicionado con hueso bovino se definió usar agregados pétreos y el cemento Argos suministrados por el laboratorio de la UGC el cual fue caracterizado por medio de los siguientes laboratorios:

**Tabla 1***Desgaste máquina de los ángeles*

CONDICIONES DE LAS PRUEBAS		REGISTRO DE RESULTADO A 100 REVOLUCIONES-CONDICIÓN SECA	REGISTRO DE RESULTADO A 500 REVOLUCIONES-CONDICIÓN SECA	REGISTRO DE RESULTADO A 500 REVOLUCIONES-CONDICIÓN SATURADA
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL, mm		12,5		
GRADACIÓN USADA			B	
Nº DE ESFERAS			11	
Nº DE REVOLUCIONES			500	
P1	MASA MUESTRA SECA ANTES DE ENSAYO, g		5000	
P2	MASA MUESTRA SECA DESPUÉS DEL ENSAYO, g		3316	
P1 - P2 = PÉRDIDA, g			1684	
PORCENTAJE DE DESGASTE, %			34%	
RELACIÓN HÚMEDO/SECO 500 REVOLUCIONES				

Nota. Elaboración propia

**Tabla 2***Equivalente de arena de suelos y agregados finos*

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO				
MÉTODO DE ENSAYO		B		
MÉTODO DE AGITACIÓN		MANUAL		
PROBETA	No.	1	2	3
LECTURA ARCILLA	(mm)	105	105	
LECTURA ARENA	(mm)	86	85	
EQUIVALENTE DE ARENA	(%)	82%	81%	
PROMEDIO	(%)	81%		

Nota. Elaboración propia

Tabla 3

Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos

LAVADO POR TAMIZ N°200 (INV E-214-13)		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO										
		TAMIZ		MASA RETENIDA EN CADA TAMIZ (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA	LÍMITES SEGÚN ESPECIFICACIÓN APLICABLE		LÍMITES SEGÚN FÓRMULA DE TRABAJO		
		in (")	mm					SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	
MASA INICIAL DE LA MUESTRA ANTES DE LAVAR (g)	1652	3"	75	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
MASA INICIAL DE LA MUESTRA SECA DESPUÉS DE LAVADO (g)	1605	2 1/2"	63,5	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
		2"	50,8	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
MASA TOTAL DE MATERIAL PASA TAMIZ N°200 (g)	47	1 1/2"	38,1	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
		1"	25,4	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
% DE MATERIAL PASA TAMIZ N°200	2,8%	3/4"	19,05	0	0,0%	0,0%	100,0%	100	100	--	--	
		1/2"	12,7	6,6	0,4%	0,4%	99,6%	100	100	--	--	
DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (INV E-122-13)		3/8"	9,52	37,8	2,3%	2,7%	97,3%	100	100	--	--	
		N°4	4,75	100,9	6,1%	8,8%	91,2%	100	95	--	--	
		N°8	2,36	136,7	8,3%	17,1%	82,9%	100	80	--	--	
N° DE RECIPIENTE	-	N°10	2	38,9	2,4%	19,4%	80,6%	-	-	--	--	
		N°16	1,18	160,2	9,7%	29,1%	70,9%	85	50	--	--	
M1	MASA HÚMEDA DEL MATERIAL + MASA DE	1894	N°30	0,595	328,7	19,9%	49,0%	51,0%	60	25	--	--
M2	MASA SECA DEL MATERIAL + MASA DE RECIPIENTE (g)	1766	N°40	0,42	284,4	17,2%	66,2%	33,8%	-	-	--	--
			N°50	0,3	279,1	16,9%	83,1%	16,9%	30	10	--	--
M3	MASA DEL RECIPIENTE (g)	114	N°100	0,15	175,5	10,6%	93,8%	6,2%	10	2	--	--
			N°200	0,075	56,3	3,4%	97,2%	2,8%	0	0	--	--
% DE HUMEDAD	7,7%	FONDO		47	2,8%	100,0%	0,0%	-	-	--	--	
		MÓDULO DE FINURA		2,8								

Nota. Elaboración propia

**Figura 2***Curva granulométrica*

Nota. Elaboración propia

**Tabla 4***Determinación de la cantidad de material*

<b>LAVADO POR TAMIZ N°200 (INV E-214-13)</b>	
MASA INICIAL DE LA MUESTRA ANTES DE LAVAR (g)	1652
MASA INICIAL DE LA MUESTRA SECA DESPUÉS DE LAVADO (g)	1605
MASA TOTAL DE MATERIAL PASA TAMIZ N°200 (g)	47
% DE MATERIAL PASA TAMIZ N°200	2,8%

Nota. Elaboración propia

Tabla 5

*Determinación en el laboratorio del contenido de agua*

DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DEL CONTENIDO DE AGUA (INV E-122-13)		
N° DE RECIPIENTE		-
M1	MASA HUMEDA	19894
	DEL MATERIAL + MASA DE	
M2	MASA SECA DEL	1766
	MATERIAL + MASA DE RECIPIENTE (g)	
M3	MASA DEL	114
	RECIPIENTE (g)	
% DE HUMEDAD		7,7%

Nota. Elaboración propia

Tabla 6.

*Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*

REGISTRO DE DATOS INICIALES				RESULTADOS DEL ENSAYO				
N° DE ENSAYO				N° DE ENSAYO		1	2	
N° DE ENSAYO				1	2	Gravedad Específica Seca al Horno, SH (adimensional)	2,365	
Condición de preparación de la muestra				PRESENTA INMERSIÓN		Gravedad Específica Condición SSS, (adimensional)	2,481	
A	Peso en aire de muestra seca, g	476,6	476,6	Gravedad Específica Aparente, (adimensional)		2,676		
B	Peso del picnómetro lleno de agua, g	654,6	654,6	Densidad Seca al Horno, Kg/m <sup>3</sup>		2361		
C	Peso del picnómetro lleno de agua + muestra, g	953,1	953,1	Densidad Condición SSS, Kg/m <sup>3</sup>		2476		
S	Peso de muestra SSS, g	500,0	500,0	Densidad Aparente, Kg/m <sup>3</sup>		2671		
Temperatura de ensayo, °C				21		Absorción, %	4,7%	

Nota. Elaboración propia

Tabla 7

Densidad Bulk.

RESULTADOS DEL ENSAYO					
ESTADO SUELTO			ESTADO COMPACTO APISONADO		
	CONDICIÓN SECA	CONDICIÓN SSS		CONDICIÓN SECA	CONDICIÓN SSS
MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4188	-	MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4584	-
(1ra Prueba)			(1ra Prueba)		
MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4230	-	MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4484	-
(2da Prueba)			(1ra Prueba)		
MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4316	-	MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g	4634	-
(3ra Prueba)			(1ra Prueba)		
(G) MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g (PROMEDIO)	4245	-	(G) MASA DEL MOLDE + MATERIAL, g (PROMEDIO)	4567	-
(M-Msss) DENSIDAD BULK, Kg/m <sup>3</sup>	1660,02	1660,80	(M-Msss) DENSIDAD BULK, Kg/m <sup>3</sup>	1786,21	1787,05
PESO UNITARIO, N/m <sup>3</sup>	16284,78	16292,43	PESO UNITARIO, N/m <sup>3</sup>	17522,70	17530,93
% DE VACIOS	29,67	32,93	% DE VACIOS	24,32	27,83
DATOS ESTABLECIDOS EN EL ENSAYO INV E-222-13 (AGREGADO FINO) O INV E-223-13 (AGREGADO GRUESO) SEGÚN APLIQUE AL TIPO DE MATERIAL Y LAS CONDICIONES DE ENSAYO					
(S) GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO DE ENSAYO,	2,365	2,481	(S) GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO DE ENSAYO,	2,365	2,481
adimensional			adimensional		
TEMPERATURA DEL AGUA DE ENSAYO, °C	21		TEMPERATURA DEL AGUA DE ENSAYO, °C	21	
(ρw) DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO, Kg/m <sup>3</sup>	998,022		(ρw) DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO, Kg/cm <sup>3</sup>	998,022	
(A) ABSORCIÓN, %	4,7%		(A) ABSORCIÓN, %	4,7%	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 8**

*Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación.*

REGISTRO DE DATOS INICIALES			
N° DE ENSAYO		1	2
Condición de preparación de la muestra		PRESENTA INMERSIÓN	
A	Peso en aire de muestra seca, g	476,6	476,6
B	Peso del picnómetro lleno de	654,6	654,6
	agua, g		
C	Peso del picnómetro lleno de agua + muestra, g	953,1	953,1
S	Peso de muestra SSS, g	500,0	500,0
Temperatura de ensayo, °C		21	

Nota. Elaboración propia

### Capítulo III (Ensayos de laboratorio realizados al hueso triturado)

#### Metodología para la purificación del hueso

El procedimiento realizado para la purificación del hueso fue realizado en base a la metodología planteada por el Ing. Iván Mora, en la cual se buscaba obtener un resultado con mayor precisión y, para el estudio del uso del hueso como material alternativo. De acuerdo con lo anterior ejecutamos los siguientes pasos:

Paso 1: Al hueso seleccionado se le realizó una limpieza inicial, en el cual se sumergió en 18.9 litros de agua caliente para facilitar el retiro de los tejidos óseos externos del hueso. (Anexo imagen 4)

Paso 2: Se realiza la trituración del material y se lleva el hueso a partes entre (pulgadas) utilizando herramienta menor tal como macetas, apisonador manual y elementos de protección personal. (Anexo imagen 7)

Paso 3: Se realizaron 3 lavados con agua caliente para retirar el material orgánico interno del hueso en un 70% (tejidos óseos y osteoide). (Anexo imagen 8)

Paso 4: Se realizar la inmersión del hueso triturado en un baño en hipoclorito de sodio en concentración al 5.25% de 15 a 20 minutos, permitiendo el retiro del material en un 100%. (Anexo imágenes 13, 14, 15)

Paso 5: Para la clasificación y determinación de los tamaños realizamos actividades en laboratorio como tamizaje, caras planas, caras alargadas, densidades de los materiales. Etc. (Anexo 20, 21 y 22)

#### **Metodología de calcinación para obtener sustituto de cemento**

Obtenidos unos 14 kg de material, se sometieron a la cocción en los hornos de cerámica del municipio de Ráquira, siguiendo temperaturas típicas de la alfarería: aproximadamente 950 °C para la primera cocción (bizcocho) y alrededor de 1.050 °C para la segunda cocción de vidriado, durante un ciclo total cercano a 17 horas (Roa, 2022).

Este proceso permite la eliminación total del material orgánico, adicional la estructura del hueso se convierte más cristalina y quebradiza, permitiendo un mejor proceso de triturado el cual se realizó en la máquina de los ángeles en la Universidad la Gran Colombia; y tamizado en un tamiz 100 y posteriormente en tamiz 200, para lograr el mismo módulo de finura para ser usado como sustituto proporcional del cemento Argos. Adicional se utilizó un molino manual tradicional para moler, con esta herramienta se llevó a mayor finura ya que en algunos casos la máquina de los Ángeles no podía llevar todo el material a la finura deseada.

#### **Metodología de trituración para ser usado como sustituto del agregado grueso**

Dentro del proceso de trituración se utilizaron varias herramientas menores con el fin de poder llevar el hueso a diferentes tamaños; tales como el martillo del ensayo de Proctor modificado para

prueba de compactación estándar, en donde se dejaron partículas de  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{8}$  y  $\frac{1}{4}$ , complementando con estos tamaños los porcentajes requeridos según la curva granulométrica del agregado pétreo triturado grueso.

### **Metodología para el diseño de mezcla base**

Para el diseño de la mezcla de concreto base se tomó como referencia Matallana (2023). La granulometría óptima para un concreto de 21 MPa fue definida como 56 % arena y 44 % grava, obtenida y optimizada mediante el método RNL (Matallana, 2023), cumpliendo por lo tanto los parámetros de la norma ACI 211 relacionados a continuación:

- Selección de requisitos.
- Determinación de agua y aire
- Relación agua/cemento.
- Cálculo de materiales.
- Ajustes a la mezcla de prueba

Teniendo en cuenta lo anterior, en las siguientes tablas se da a conocer los parámetros y los resultados obtenidos.

Tabla 9

*Caracterización de los componentes del concreto*

<b>AGUA</b>		
Contenido de Agua (1)	185	Kg/m3
Contenido de Agua (2)	215	Kg/m3
Contenido de Agua Tomado	215	Kg/m3
Relación a/c	0,45	
<b>CEMENTO</b>		
Densidad Cemento	3075,6	Kg/m3
<b>AGREGADO GRUESO 90%</b>		
Densidad aparente	2436,4	Kg/m3
%Humedad	4,42	
%Absorción	5,86	
Densidad MUS	1259	Kg/m3
Densidad MUC	1315	Kg/m3
<b>AGREGADO FINO</b>		
Densidad aparente	2671	Kg/m3
%Humedad	0,0378	
%Absorción	0,047	
Densidad MUS	1661	Kg/m3
Densidad MUC	1787	Kg/m3
Densidad Hueso calcinado	3000	
Densidad cemento Argos	3084	
<b>AGREGADO GRUESO 90%</b>		
Densidad aparente	2517	Kg/m3
%Humedad	0,048	
%Absorción	0,049	
<b>AGREGADO GRUESO DE HUESO 10 %</b>		
Densidad aparente	1711	Kg/m3
%Humedad	0,01	
%Absorción	14,50%	

Nota. Elaboración propia

**Tabla 10***Relación agua-cemento*

PROPORCIÓN AGUA, CEMENTO Y AIRE				
Material	Masa (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Proporción
Agua	215	1000	0,215	0,45
Cemento	478	3075,6	0,155	2,22
Aire	0	0	0,025	-

Nota. Elaboración propia

**Tabla 11***Corrección por humedad de los agregados*

<b>Volumen Agua + Cemento + Aire</b>		0,395	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	
<b>Volumen Agregados</b>		0,605	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	
<b>Diferencia de densidades de los Agregados</b>	9,2%	<b>Densidad Aparente Promedio</b>	2534	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Peso total de Agregados</b>	1532,4	Kg/m <sup>3</sup>		
<b>Peso Agregado Grueso</b>	674,3	Kg/m <sup>3</sup>		
<b>Peso Agregado Fino</b>	858,1	Kg/m <sup>3</sup>		
<b>Agua por defecto/exceso del agregado grueso (A<sub>g</sub>):</b>	970,9	Kg/m <sup>3</sup>		
<b>Agua por exceso/defecto del agregado fino (A<sub>f</sub>):</b>	7,9	Kg/m <sup>3</sup>		
<b>Agua por exceso/defecto total de los agregados (A<sub>TA</sub>):</b>	978,8	Kg/m <sup>3</sup>		

Nota. Elaboración propia

**Tabla 12***Diseño de mezcla concreto base*

DISEÑO FINAL DE MEZCLA DE CONCRETO BASE					
Material	Masa (Kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje en Peso	Peso húmedo (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Agua	215	9,5%	189,4	1000	0,22
Cemento	478	21,2%	478	3084	0,15
Aire	0	0,0%	0	0	0,025
A.G	687,6	30,5%	720,6	2517	0,27
A.F	875,1	38,8%	942,5	2671	0,33
<b>TOTAL</b>	<b>2255,4</b>	<b>100,0%</b>	<b>2330,2</b>		<b>1,00</b>

Nota. Elaboración propia

**Capítulo IV (Elaboración, Curado y fallo a compresión de cilindros de concreto)****Metodología para el diseño de mezcla modificada**

Teniendo como punto de partida el diseño de mezcla base previamente establecido y rigurosamente caracterizado, se procede a la etapa de ajuste experimental con el fin de formular una nueva composición. El objetivo principal de esta modificación es la inclusión controlada de hueso bovino como material sustituto parcial, buscando evaluar su potencial como reemplazo en la matriz cementicia y determinar su impacto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto resultante.

El proceso de ajuste del diseño requiere una cuantificación precisa de las variables inherentes tanto a los agregados existentes como al nuevo material incorporado. Dentro de las consideraciones esenciales (Cordero et al., 2019). Se debe determinar con exactitud la humedad de los agregados, un factor crítico para el cálculo preciso de la cantidad de agua de mezcla efectiva. Asimismo, es fundamental caracterizar el material sustituto, realizando la medición de la densidad aparente y real del hueso bovino en su estado triturado y calcinado.

Finalmente, la granulometría del conjunto de materiales se abordó como un aspecto decisivo en la finalización del ajuste de la mezcla. La incorporación del hueso bovino, como material sustituto, impactó directamente la distribución del tamaño de partícula, lo cual fue cuantificado y analizado mediante la curva granulométrica resultante. El objetivo de este análisis fue asegurar una distribución óptima que garantizara la máxima compacidad y la trabajabilidad adecuada de la nueva formulación. La correcta consideración de estos parámetros permitió validar la dosificación final, cuyos efectos sobre el rendimiento mecánico serán detallados y discutidos exhaustivamente en la sección de Resultados de esta investigación.

A continuación, se relacionan las cantidades del diseño de mezcla con adición de hueso.

**Tabla 13**

*Diseño de mezcla de concreto con adición de hueso*

<b>DISEÑO FINAL DE MEZCLA DE CONCRETO con adición de hueso bovino</b>					
<b>Material</b>	<b>Masa (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Porcentaje en Peso</b>	<b>Peso húmedo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad Aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
Agua	215,0	9,7%	199,0	1000	0,23
Cemento	430,0	19,3%	430,0	3084	0,139
Hueso calcinado	47,8	2,1%	47,8	3000	0,016
Aire	0,0	0,0%	0,0	0	0,025
A.G	606,8	27,3%	607,1	2517	0,241
Hueso triturado	67,4	3,0%	67,4	1711	0,040
A.F	858,1	38,6%	924,2	2671	0,330
<b>TOTAL</b>	<b>2225,2</b>	<b>100,0%</b>	<b>2275,5</b>		<b>1,02</b>

Nota. Elaboración propia

### **Ejecución de probetas curado**

El procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto (RCC) se fundamentó en las directrices establecidas por la (NTC 673). Esta normativa indica los requisitos y

métodos para el ensayo de cilindros de concreto hidráulico, asegurando la uniformidad y la comparabilidad de los resultados.

Específicamente, los especímenes de prueba empleados en esta investigación fueron cilindros de concreto estandarizados con dimensiones de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura (equivalentes a 4 pulgadas por 8 pulgadas). La elección de este formato dimensional se adhiere rigurosamente al estándar colombiano para la caracterización de las propiedades mecánicas del material, proporcionando la base necesaria para la posterior evaluación y análisis de la influencia del material sustituto (hueso bovino) en la capacidad portante del concreto.

Tomando de referencia la NTC 673 con respecto al ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, nuestro estudio se precisa en cilindros de 100 por 200 mm o 4 pulgadas por 8 pulgadas.

- Resultados de las pruebas de (RCC) con adición de hueso (Ver Anexo fallo cilindros)
- Resultados de las pruebas de (RCC) base (Ver Anexo datos de mezcla)

**Tabla 14***Resistencia a compresión obtenida del concreto base*

Días	Masa, g	Carga Máxima, KN
7	3838	97,8
7	3668	97,8
7	3756	88,7
14	3643	144,1
14	3632	139,6
14	3593	132,9
28	3746	177,0
28	3796	177,0
28	3786	171,9
28	3698	163,6
28	3770	169,3
28	3772	172,9
28	3786	172,0
35	3820	189,7
35	3608	185,5
35	3718	184,3
35	3760	184,8
35	3848	187,1
35	3826	186,6
35	3718	179,3
42	3736	199,7
42	3794	216,2
42	3746	202,8
42	3748	202,4
42	3682	182,6
42	3708	179,8
42	3782	189,2

Nota. Elaboración propia

**Tabla 15***Resistencia a compresión obtenida del concreto modificado*

Días	Peso Kg	Carga Máxima KN
7	3644	64,7
7	3628	67,4
14	3482	86,4
14	3668	94,2
28	3670	111,2
28	3670	96,6
28	3640	97,8
28	3602	108,8
35	3603	133,4
35	3634	103,1
35	3742	109,1
35	3701	140,4
35	3614	122,6
35	3715	154,7
42	3720	138,5
42	3644	155,5
42	3746	114,6
42	3620	128,7
42	3692	111,8
42	3682	157,8
42	3712	143,6

Nota. Elaboración propia

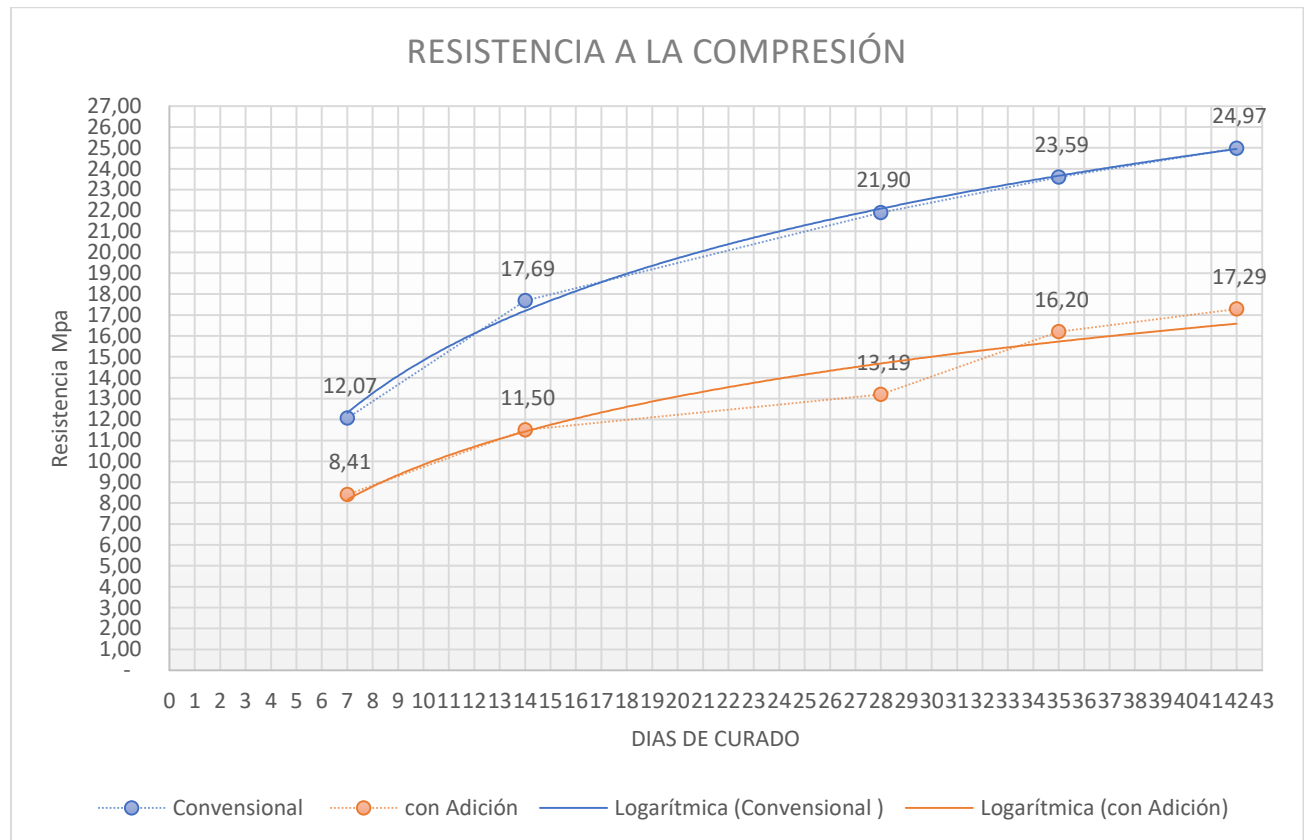
**ANÁLISIS CUANTITATIVO DE FALLAS A COMPRESIÓN****Tabla 16***Cuadro comparativo resultados de laboratorio*

Días	Concreto base 21 Mpa convencional				Concreto con adición del 10%			
	Promedio (KN)	Kn/m2	Mpa	% F'c diseño	Promedio (KN)	Kn/m2	Mpa	% F'c diseño
7	94,8	120,703,109	12,07	57%	66,05	840,974,719	8,41	40%
14	138,9	176,852,973	17,69	84%	90,3	114,973,531	11,50	55%
28	172	218,997,202	21,90	104%	103,6	131,907,617	13,19	63%
35	185,3	235,931,288	23,59	112%	127,22	161,977,291	16,20	77%
42	196,1	249,682,275	24,97	119%	135,8	172,887,741	17,29	82%

Nota. Elaboración propia

**Figura 3**

*Resistencia a la compresión*



Nota. Elaboración propia

Porcentaje de la mezcla convencional, alcanzado por la mezcla con adición 69%

Con base en los datos de la tabla 16, que presenta los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, se establece una clara comparación entre el comportamiento del concreto de diseño base y las probetas elaboradas con la adición de hueso bovino como material sustituto.

La observación detallada de los resultados indica una disminución significativa y directamente proporcional de la resistencia última a la compresión en los especímenes que incorporaron el material

de hueso. Esta tendencia fue constante a lo largo de las distintas edades de curado y que sugiere una modificación en la microestructura o una alteración en las propiedades del material cementante debido a la inclusión del sustituto.


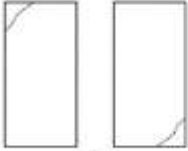

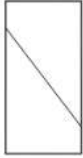

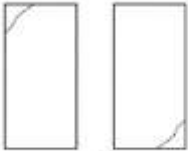




Esta reducción en la capacidad portante es un hallazgo crítico para la investigación. De tal manera los valores exactos y los porcentajes de disminución presentados en la Tabla 16 y la figura 3 el patrón gráfico subraya que la inclusión del hueso bovino, bajo las condiciones experimentales empleadas, compromete la resistencia mecánica del concreto. Este fenómeno será objeto de una discusión profunda en el siguiente capítulo, donde se explorarán las posibles causas, como la morfología de los huesos triturados y la influencia en la porosidad de la matriz.

### **ANÁLISIS CUALITATIVO DE FALLAS A COMPRESIÓN**

Tras el ensayo destructivo de los especímenes, se procedió a un análisis detallado de las superficies de falla de los cilindros con adición de hueso bovino. Los resultados de esta inspección visual, documentados en las imágenes relacionadas a continuación.

Tabla 17

Tipos de fallas en cilindro

Días	Evidencia fotográfica	Tipo de Falla según Norma NTC 673
7		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
14		 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>
28		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
35		 <p>Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados</p>
42		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>

Nota. Elaboración propia

La inspección visual también revela una deficiencia aparente en la adherencia interfacial entre el material sustituto y la matriz de cemento-agregados. Específicamente, se observó que la cara lisa interna del hueso triturado (proveniente de la sección cortical del fémur) no logró desarrollar una unión fuerte con los demás componentes del concreto. Esta falta de unión efectiva es una indicación directa de una pobre transición de la zona interfacial entre el hueso y la pasta de cemento. La presencia de superficies lisas en el hueso pudo haber dificultado la formación de enlaces químicos y la trabazón mecánica necesaria.

Esta deficiencia de adherencia es identificada como una de las principales causas microestructurales de la disminución significativa de la resistencia a la compresión previamente señalada. Una adherencia precaria genera planos de debilidad dentro de la masa del concreto, actuando como iniciadores de fisuras bajo cargas y explicando la falla prematura de los cilindros. Este hallazgo subraya la necesidad de un tratamiento superficial previo del hueso para mejorar su rugosidad y reactividad antes de su incorporación.

#### **Figura 4**

*Inspección visual de la adherencia de los agregados*



**Nota.** Elaboración propia

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- \* El estudio permitió analizar satisfactoriamente el comportamiento del concreto convencional modificado mediante la inclusión de un 10 % de hueso bovino triturado como agregado grueso y la sustitución del 10 % del cemento por hueso bovino calcinado, siguiendo los lineamientos de la norma ACI 318. Los resultados confirman la viabilidad de esta alternativa como una opción sostenible y funcional dentro de los parámetros técnicos evaluados.
- \* El procedimiento se ejecutó bajo control de calidad: se removieron impurezas orgánicas, se aplicaron tratamientos de purificación y se molió el hueso a la granulometría prevista. Como resultado se obtuvo una materia prima homogénea y reproducible que puede integrarse en la dosificación del concreto, facilitando ensayos de trabajabilidad, densidad y resistencia.
- \* El diseño de mezcla óptimo determinado en esta investigación, compuesto por un 10 % de hueso bovino triturado como agregado y un 10 % de sustitución de cemento por hueso calcinado, cumple con los criterios establecidos por la ACI 318. No obstante, aunque la mezcla favorece el aprovechamiento de residuos orgánicos y aporta al enfoque de sostenibilidad, presenta una disminución significativa en la resistencia a la compresión respecto al concreto convencional.
- \* La elaboración de las probetas tanto de concreto convencional como modificado se realizó de manera exitosa, siguiendo el diseño de mezcla establecido. Los ensayos de compresión aplicados a 7, 14, 28, 35 y 42 días evidenciaron un comportamiento estructural progresivo y estable, demostrando la factibilidad del material y su contribución al aprovechamiento de residuos orgánicos.
- \* Desde la perspectiva constructiva, la incorporación de hueso bovino como agregado alternativo permitió mantener una trabajabilidad adecuada y propiedades mecánicas aceptables para ciertos usos.

Esto posiciona al concreto modificado como una alternativa ecológica, funcional y potencialmente viable en términos económicos, aunque con limitaciones en su resistencia.

\* Las pruebas indicaron que el concreto modificado aporta ventajas ambientales y promueve prácticas constructivas más sostenibles, pero su desempeño mecánico, específicamente la resistencia a compresión (RCC), quedó por debajo del concreto convencional. Esto implica que antes de su aplicación estructural deben realizarse optimizaciones de la dosificación (por ejemplo, variaciones en la proporción de aglutinante, tamaño de partículas o tratamientos del agregado) para lograr un equilibrio aceptable entre seguridad y sostenibilidad.

### **Recomendaciones**

\* Se recomienda desarrollar mezclas con diseños de mayor resistencia inicial, con el fin de determinar el porcentaje real de pérdida de resistencia asociado a la incorporación de hueso bovino triturado y calcinado. Este análisis permitirá establecer límites adecuados de sustitución que no comprometan el desempeño estructural.

\* Se recomienda ampliar los estudios para identificar y cuantificar los beneficios ambientales derivados del uso de residuos animales en la fabricación de concreto, especialmente en relación con la reducción de desechos y el fortalecimiento de la economía circular.

\* Es aconsejable evaluar otras proporciones de sustitución, granulometrías del material óseo y combinaciones con aditivos, con el propósito de optimizar la resistencia mecánica sin sacrificar el enfoque sostenible del material.

\* El análisis visual de los resultados evidenció que la capa interna de los huesos no genera una adherencia adecuada con los demás componentes del concreto. Esta condición favorece la aparición de fallas o rupturas prematuras y, por ende, una reducción en la (RCC). En consecuencia, se recomienda desarrollar una nueva línea de investigación orientada a analizar de manera detallada la interacción y

cohesión entre la pared interna del hueso y el material cementante del concreto. Este enfoque permitirá identificar los factores que limitan su compatibilidad y, posteriormente, plantear estrategias que contribuyan a mejorar el desempeño mecánico del concreto modificado. (Ver Anexo)

**BIBLIOGRAFÍA**

- American Concrete Institute (2002). *ACI 211.1R-02 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. ACI. <https://es.slideshare.net/slideshow/aci-318-19-espalsistema-internacional/256184668>
- Alvis Calsina, J. L. (2020). *Sistema óseo de vacunos*. Instituto Idema [https://books.instituto-idema.org/sites/default/files/2020\\_10\\_17\\_09\\_58\\_57\\_george\\_90\\_hotmail.com\\_sistema\\_oseo\\_en\\_vacunos\\_2.pdf](https://books.instituto-idema.org/sites/default/files/2020_10_17_09_58_57_george_90_hotmail.com_sistema_oseo_en_vacunos_2.pdf)
- Angulo Zavaleta, V. L. (2020). *Materiales alternativos sostenibles empleados en la construcción: Una revisión de la literatura científica* <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23755>
- Ardila Barreto, J. S., & Echeverry Arias, J. B. (2018). *Modificación del diseño de mezcla del concreto convencional a partir del uso del hueso triturado como agregado grueso para ensayos de resistencia a la compresión* (Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia). <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/8775>
- Cadena, J. (2014). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánicos para incrementar su resistencia ante ataques de sulfatos*. Universidad Autónoma de Querétaro facultad de ingeniería, Querétaro, México.
- Cordero Estévez, G. D., Cárdenas Gutiérrez, J. A., & Rojas Suárez, J. P. (2019). *Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI* (1.ª ed.). Ecoe Ediciones; Universidad Francisco de Paula Santander. ISBN 978-958-771-705-1. <https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/25>

Díaz, G. M. (13 de junio de 2015). Biomaterial regeneraría huesos de mascotas.

<http://www.unperiodico.unal.edu.co/en/dper/article/biomaterial-regeneraria-huesos-de-mascotas.html>

Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P., (2010). Metodología de la investigación Quinta Edición.

Ciudad de México, México, Mc Graw Hill.

Instituto Nacional de Vías. (s. f.). Norma INV E-230. (2013). *Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para Carreteras*. Bogotá.

Mancipe, J., Pereira, L. y Bermúdez D. (2007). Diseño de concretos de alta resistencia a partir de una puzolana natural. Universidad de la Salle, Bogotá. Recuperado de

<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15323/T40.07%20M31d.pdf?sequence=1>

Martínez, M. J. (1998). *Obras en concreto reforzado*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

Matallana Rodríguez, R. (2023). *El concreto: Fundamentos y nuevas tecnologías*. Corona. Bogotá

<https://conconcreto.com/wp-content/uploads/2023/02/EL-CONCRETO-Fundamentos-y-nuevas-tecnologias..pdf>

Norma Técnica colombiana NTC 221. (1995). *Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*.

Norma Técnica colombiana NTC 396. (2021). *Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*. Bogotá.




Norma técnica Colombiana. NTC 226. (1995). *Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por de los tamices*. Bogotá.

- Pedraza Acevedo, F. A., Riveira Iguarán, M. P., & Velásquez Vega, E. V. (2017). *Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto hidráulico con reemplazo parcial de cemento por hueso bovino calcinado* (Trabajo de investigación para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad Piloto de Colombia. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5008>
- Rivera, G. A. (1994). *Agregados para mortero o concreto*. Valle del Cauca: Universidad del Valle.
- Roa Monroy, A.F. (2022). *Referencial Nacional de Cerámica*. Ráquira, Boyacá. <https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/handle/001/13985>
- Ross, M. H. (2007). *Histología: texto y atlas*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Sánchez, F. (2006). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Pontificia Universidad.
- Silverstein JA, M. J. (2011). *Common Issues In Orthopedics*. Philadelphia.
- Somma de Feré, G., & Rochinotti, D. (2004). *Uso de la ceniza de huesos para la suplementación mineral de rumiantes en pastoreo*. E.E.A. INTA Mercedes, Corrientes. Noticias y Comentarios, Nº 386. [https://www.produccion-animal.com.ar/suplementacion\\_mineral/53-uso\\_ceniza\\_hueso.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/suplementacion_mineral/53-uso_ceniza_hueso.pdf)
- Tobón, J. I. (2000). Puzolana en los alrededores de Irra. *DYNA*, 67(129), 77–83. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/115205>
- Zavaleta, V. L. (2018). *Materiales alternativos sostenibles empleados en la construcción: una revisión de la literatura científica*. Cajamarca, Perú <https://hdl.handle.net/11537/23755>

## ANEXOS




## METODOLOGÍA – ANEXOS

1. SELECCIÓN DEL MATERIAL		
		
<p><i>Imagen 1. Obtención de hueso bovino. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 2. Obtención de hueso bovino. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 3. Lavado de hueso bovino. Fuente: propia.</i></p>

<b>2. LIMPIEZA</b>		
		
<i>Imagen 4. Lavado de hueso bovino con agua caliente. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 5. Levantamiento de capa superficial del hueso con bisturí. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 6. Resultado obtenido después de la limpieza con bisturí. Fuente: propia.</i>

<b>2. LIMPIEZA</b>		
		
<i>Imagen 7. Trituración de hueso para facilitar la limpieza interior. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 8. Huesos triturados en agua caliente para limpieza final. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 9. Limpieza final del hueso bovino Fuente: propia.</i>

<b>3. TRITURACIÓN</b>		
		
<i>Imagen 10. Trituración de hueso usando martillo mecánico, con un tamaño máximo de 1 pulgada. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 11. Trituración de hueso usando martillo masrshaal, con un tamaño máximo de 1 pulgada. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 12. Trituración de hueso bovino tamaño máx. 1 pulgada. Fuente: propia.</i>

<b>4. PURIFICACIÓN</b>		
		
<i>Imagen 13. Purificación de los huesos triturados mediante la adición de blanqueador (Clorox). Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 14. Reacción química entre el blanqueador (Clorox) y el hueso triturado. Fuente: propia.</i>	<i>Imagen 15. Reacción química entre el blanqueador (Clorox) y el hueso triturado. Fuente: propia.</i>

**4. PURIFICACIÓN**

*Imagen 16. Resultado final de la purificación del hueso con blanqueador (Clorox). Fuente: propia.*



*Imagen 17. Resultado final de la purificación del hueso con blanqueador (Clorox). Fuente: propia.*

**4. CALCINACIÓN**

*Imagen 18. Colocación de hueso triturado en vasijas especiales, previo a la introducción al horno. Fuente: propia.*



*Imagen 19. Proceso de calcinación: Hueso triturado colocado en el horno a más de 1000° Celsius. Fuente: propia.*

Ensayos realizados con agregados gruesos, reemplazados con hueso triturado de bovino.

<b>ENSAYO ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS</b> <b>INV E – 230 – 13</b>		
		
<p><i>Imagen 20. Clasificación y separación del material según el tamaño de las partículas (alargamiento y aplanamiento). Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 21. Tamiz 3/8 a 1/4 alargamiento. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 22. Pasa Alargamiento 1/2 Fuente: propia.</i></p>

<b>ENSAYO ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS</b> <b>INV E – 230 – 13</b>		
		
<p><i>Imagen 23. Peso Alargamiento 1/2. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 24. Clasificación y separación del material según el tamaño de las partículas (alargamiento y aplanamiento). Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 25. Proceso de alargamiento Fuente: propia.</i></p>

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO INV E – 213 – 13



Imagen 26. Muestra inicial para el ensayo de granulometría Fuente: propia.



Imagen 27. Muestra que pasa tamiz 3/4. Fuente: propia.



Imagen 28. Muestra que pasa tamiz 1/2. Fuente: propia.

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO INV E – 213 – 13



Imagen 29. Muestra que pasa tamiz #4. Fuente: propia. Fuente: propia.



Imagen 30. Muestra que pasa tamiz 1/4. Fuente: propia.



Imagen 31. Muestra que pasa tamiz 3/8. Fuente: propia.

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO INV E – 213 – 13



Imagen 32. Resultado final. Fuente: propia.



Imagen 33. Proceso de tamizado de muestras. Fuente: propia.

## ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NTC 176



Imagen 34. Muestra de agregado peso saturado. Fuente: propia.



Imagen 35. Muestra de agregado sumergible en agua durante 24 h para saturar los poros. Fuente: propia.



Imagen 36. Secado superficial de la muestra con un trapo adsorbente. Fuente: propia.

<b>ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NTC 176</b>	
	
<p><i>Imagen 37. Peso de la muestra superficialmente seca. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 38. Muestra en contenedor para determinar su masa aparente en agua. Fuente: propia.</i></p>

<b>ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NTC 176</b>		
		
<p><i>Imagen 39. Muestra de agregado peso saturado. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 40. Muestra de agregado (hueso) peso saturado. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 41. Muestra de agregado (hueso grava) peso saturado. Fuente: propia.</i></p>

ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO NTC 176		
		
<p>Imagen 42. Peso de la muestra superficialmente seca. Fuente: propia.</p>	<p>Imagen 43. Muestra en contenedor para determinar su masa aparente en agua (grava +hueso). Fuente: propia.</p>	<p>Imagen 44. Muestra de agregado (hueso grava) Seco. Fuente: propia.</p>
PROCEDIEMINTO DE TRITURACIÓN - HUESO CALCINADO		
		
<p>Imagen 45. Muestra de hueso bobino calcinado. Fuente: propia.</p>	<p>Imagen 46. Método de trituración a través de la máquina de los Ángeles. Fuente: propia.</p>	<p>Imagen 47. Resultado de trituración a través del Método de trituración máquina de los Ángeles. Fuente: propia.</p>

PROCEDIEMINTO DE TRITURACIÓN - HUESO CALCINADO		
		
<p><i>Imagen 48. Método de trituración a través de un molino de maíz. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 46. Método de trituración a través de la máquina de los Ángeles. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 47. Tamizado de la muestra con tamiz #200. Fuente: propia.</i></p>

PROCEDIEMINTO DE TRITURACIÓN - HUESO CALCINADO	
	
<p><i>Imagen 48. Resultado obtenido, polvillo de hueso. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 49. Resultado obtenido, polvillo de hueso. Fuente: propia.</i></p>

## MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO – NTC 221



Imagen 50. Llenado del frasco de Chatelier con queroseno. Fuente: propia.



Imagen 51. Se introduce muestra de polvillo de hueso (cemento) en el frasco de Chatelier. Fuente: propia.



Imagen 52. Procedimiento para sacar burbujas de aire. Fuente: propia.

## MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO – NTC 221



Imagen 53. Lectura final fuente: propia.



Imagen 54. Lectura final Fuente: propia.

## DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN



Imagen 55. Cantidad de agua utilizada para el diseño de mezcla. Fuente: propia.



Imagen 56. Cantidad de Agregado grueso (hueso triturado) para el diseño de mezcla. Fuente: propia.




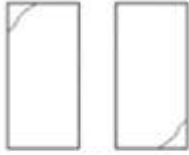






Imagen 57. Cantidad de cemento utilizada para el diseño de mezcla. Fuente: propia.











## DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN




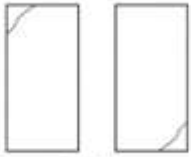









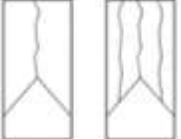








<p><i>Imagen 58. Cantidad de arena utilizada para el diseño de mezcla. Fuente: propia</i></p>	<p><i>Imagen 59. Cantidad de grava para el diseño de mezcla. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 60. Cantidad de polvo de hueso (cemento) utilizada para el diseño de mezcla. Fuente: propia</i></p>
<p><b>DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN</b></p>		
		
<p><i>Imagen 61. Preparación de la mezcla. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 62. Prueba de la consistencia del concreto in situ. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 63. Prueba de la consistencia del concreto in situ. Fuente: propia.</i></p>
<p><b>DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN</b></p>		
		




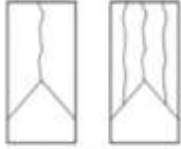



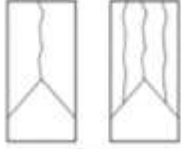


<p><i>Imagen 64. Prueba de la consistencia del concreto in situ. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 65. Prueba de la consistencia del concreto in situ. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 66. Toma de lectura, prueba de la consistencia del concreto in situ. Fuente: propia.</i></p>
<p><b>DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN</b></p>		
		
<p><i>Imagen 67. Llenado de las probetas de concreto. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 68. Probetas de concreto. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 69. Probetas de concreto. Fuente: propia.</i></p>
<p><b>DISEÑO DE LA MEZCLA CREADO CON CEMENTO DE HUESO Y HUESOS TRITURADOS CON TAMAÑO MAX 1IN</b></p>		
		
<p><i>Imagen 70. Desencofrado probetas de concreto. Fuente: propia.</i></p>	<p><i>Imagen 71. Introducción de los cilindros de concreto al baño María para su fraguado previo a la realización de las pruebas de falla. Fuente: propia.</i></p>	




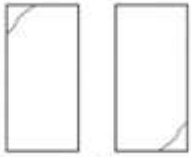

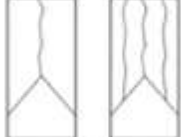


Fecha	Días	Peso	Muestra	Carga Máxima KN	1 kN = 224.8 lbf	Área (in <sup>2</sup> )	F <sub>c</sub> (Psi)	Evidencia fotográfica	Tipo de Falla según Norma NTC 673
8/08/2025	7	3556	1	21,4	4811	12,18	395		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
8/08/2025	7	3628	2	67,4	15152	12,18	1244		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
8/08/2025	7	3644	3	64,7	14545	12,18	1194		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
15/08/2025	14	3684	1	34,9	7846	12,18	644		 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>

15/08/20 25	14	348 2	2	86,4	19424	12,1 8	159 5		 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>
15/08/20 25	14	366 8	3	94,2	21177	12,1 8	173 9		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
29/08/20 25	28	371 0	1	58,2	13084	12,1 8	107 4		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
29/08/20 25	28	360 6	1	43	9667	12,1 8	794		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
29/08/20 25	28	367 0	2	111,2	24999	12,1 8	205 2		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>

29/08/20 25	28	367 0	2	96,6	21717	12,1 8	178 3		 Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)
29/08/20 25	28	364 0	3	97,8	21986	12,1 8	180 5		 Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)
29/08/20 25	28	360 2	3	108,8	24459	12,1 8	200 8		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.
5/09/202 5	35	370 1	2	140,4	31563	12,1 8	259 1		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.
5/09/202 5	35	361 4	2	122,6	27562	12,1 8	226 3		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.

5/09/2025	35	3715	2	154,7	34778	12,18	2855		 <p>Tipo 2 Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo</p>
5/09/2025	35	3603	3	133,4	29990	12,18	2462		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
5/09/2025	35	3634	3	103,1	23178	12,18	1903		 <p>Tipo 3 Fisuras verticales en columnas a través de ambos extremos, conos mal formados</p>
5/09/2025	35	3742	3	109,1	24527	12,18	2014		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
12/09/2025	42	3698	1	50,8	11420	12,18	938		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>

12/09/20 25	42	365 4	1	52,1	11713	12,1 8	962		 Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)
12/09/20 25	42	365 4	2	97,6	21941	12,1 8	180 1		 Tipo 2 Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo
12/09/20 25	42	372 0	2	138,5	31136	12,1 8	255 6		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados
12/09/20 25	42	364 4	2	155,5	34958	12,1 8	287 0		 Tipo 2 Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo
12/09/20 25	42	374 6	2	114,6	25763	12,1 8	211 5		 Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados

12/09/20 25	42	362 0	3	128,7	28933	12,1 8	237 5		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
12/09/20 25	42	369 2	3	111,8	25134	12,1 8	206 4		 <p>Tipo 5 fracturas en los lados en las partes superior o inferior (ocurre comúnmente con cabezales no adheridos)</p>
12/09/20 25	42	368 2	3	157,8	35475	12,1 8	291 3		 <p>Tipo 2 Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo</p>
12/09/20 25	42	371 2	3	143,6	32283	12,1 8	265 0		 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>