

Evaluación de la resistencia a la compresión en mezclas de mortero aplicando reemplazo del agregado fino por hueso porcino triturado siguiendo lo establecido en la normativa vigente colombiana

Carolina Isabel Rodríguez Díaz y Valeria Isabel Goenaga Delgado

Departamento de civil y ambiental, Universidad de la Costa, CUC

Programa de Ingeniería Civil

Asesor: MSc. Hernando Cabrera Hernández y Co asesor: PhD. Michel Johana Murillo Acosta.

Abril, 2022



Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

A Dios, porque de su mano he obtenido muchas oportunidades y bendiciones dentro de la universidad y en mi vida, y esas me han llevado a donde hoy estoy.

A mis padres, quienes con su apoyo, amor y esfuerzo me han inspirado a superarme, a dar todo por lograr mis metas, quienes han estado en todos y cada uno de los momentos felices y difíciles hasta el presente día y quienes han sido los cimientos para la persona que soy.

A mi abuela, quien con su cariño me ha cuidado desde el día en que nací y a la cual espero enorgullecer al obtener mi título.

A mis hermanas, quienes han demostrado interés siempre por mis objetivos y son capaces de brindar consejo y apoyo.

Valeria Isabel Goenaga Delgado

A mi familia por inculcarme la importancia de la educación y apoyarme en cada una de las metas que me he propuesto.

A los docentes que durante la carrera a través de su vocación y dedicación me enseñaron el significado de ser un profesional integral.

A Dios por guiarme y enseñarme durante este camino lleno de retos y aprendizajes.

Carolina Isabel Rodríguez Díaz

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de la Costa y al programa de Becas Opción por contribuir en mi formación profesional e integral y por brindarnos los espacios y recursos para desarrollar este proyecto; a la empresa Ultracem S.A.S. por colaborarnos con su personal, materiales e instalaciones; a los docentes quienes me transmitieron sus conocimientos y experiencias; al Ingeniero Hernando Cabrera, nuestro tutor, quien nos brindó apoyo y constante motivación por la investigación, al igual que la Ingeniera Michel Murillo; y mi familia y pareja, los cuales me aconsejan, acompañan y apoyan en el cumplimiento de mis metas.

Valeria Isabel Goenaga Delgado

Agradezco a la universidad y al programa de Becas Opción por brindarme la oportunidad de labrarme un título profesional. A mi familia quienes han estado a mi lado apoyándome en cada paso que me ha traído hasta aquí, a mis amigos de la vida y los que me regaló la universidad por acompañarme en este proceso y a mi pareja por recordarme que los esfuerzos que se hacen en pro de una meta son recompensados.

Un profundo agradecimiento también al Ingeniero Hernando por abordar esta aventura con nosotras, también a la Ingeniera Michel y a la empresa Ultracem S.A.S. por aportar a este proyecto.

Por último, le agradezco a Dios por permitirme obtener esta formación académica pero también por permitirme vivir una experiencia integral llena de retos y enseñanzas enriquecedoras.

Carolina Isabel Rodríguez Díaz

Resumen

El departamento del Atlántico (Colombia) destaca por su producción porcina por lo que es viable el aprovechamiento de sus subproductos. Es por ello, con un trasfondo de sostenibilidad, que en la presente investigación se analizó la resistencia a la compresión en cubos de mortero haciendo reemplazos, en peso, del agregado fino por hueso porcino triturado (HPT), previamente tratado y limpiado, aplicando los porcentajes de sustitución del 0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, con el fin de identificar el efecto que este material generaba en el comportamiento mecánico y físico de las muestras. Para el desarrollo experimental, se elaboraron 162 cubos, los cuales fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días. El diseño de mezcla y la caracterización de los materiales se realizaron de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana, para lo cual se manejaron las siguientes: NTC 220, NTC 77, NTC 237, NTC 1776, NTC 92 y NTC 127. Como conclusión, se encontró que, a los 28 días, el mayor valor del promedio de resistencia a la compresión obtenido, para los cubos con reemplazo de hueso, fue de 2599 PSI para los cubos con reemplazo del 2% y el menor valor de resistencia fue de 1095.22 PSI con un reemplazo del 10%, siendo que el espécimen del 0% alcanzó una resistencia de 4708.2 PSI; en este sentido, se observó que la resistencia se reduce con el aumento del porcentaje de reemplazo, debido a la presencia de material orgánico en el HPT.

Palabras clave: resistencia a la compresión, mortero, hueso porcino triturado, agregado fino, construcción sostenible

Abstract

The department of Atlántico (Colombia) stands out for its pig production, so it is viable taking advantage of its derivatives. For this reason, with a background of sustainability, the present research analyzed the compressive strength of mortar cubes by replacing the fine aggregate with crushed pork bone, which was previously treated and cleaned, applying weight substitution percentages of 0%, 2%, 4 %, 6%, 8% and 10%, to identify the effect that this material generated in the mechanical and physical behavior of the samples.

For the experimental development, 162 cubes were made, which were tested at 7, 14 and 28 days. The mortar design and the characterization of the materials was carried out in accordance with the Norma Técnica Colombiana, for which the following were considered: NTC 220, NTC 77, NTC 237, NTC 1776, NTC 92 and NTC 127. It was found that, at 28 days, the highest value of the average compressive strength obtained, to the cubes with bone replacement, was 2599 PSI with a 2% replacement and the lowest value of strength was 1095.22 PSI with a 10% replacement, recognizing that the 0% specimen achieved a strength of 4708.2 PSI; in this sense, it was detected that the resistance will be reduced with the increase of the percentage of replacement due to the presence of organic material in the crushed pork bone.

Keywords: compressive strength, mortar, crushed pork bone, fine aggregate, sustainable construction

Contenido

Lista de tablas y figuras	10
Introducción	14
Planteamiento del problema	20
Justificación	23
Objetivos	26
Objetivo general	26
Objetivos específicos	26
Marco teórico-conceptual	27
Mortero	27
Usos del mortero	27
Propiedades del mortero estado plástico	27
Manejabilidad	27
Retención de agua	28
Tiempo de fraguado	29
Contenido de aire	29
Propiedades del mortero en estado endurecido	29
Retracción de secado	29
Adherencia	29
Resistencia mecánica	30
Método de ensayo para el mortero.	30
Factores que influyen en la resistencia.	30
Tipos de mortero de mampostería	31
Materiales componentes del mortero	32
Cemento portland	32
Agregados	33
Agua	34
Aditivos	35

Agentes aireantes.	35
Reductores de agua.	35
Retardantes.	36
Aceleradores.	36
Hueso	36
Subtipos de tejido óseo	36
Tejido óseo compacto.	37
Tejido óseo esponjoso.	37
Estado del arte	38
Uso de materiales orgánicos como reemplazo de agregado	38
Uso de osamentas como reemplazo de material cementante	40
Limpieza y trituración del hueso	42
Diseño metodológico	45
Desarrollo experimental	48
Fase 1: Investigación del marco teórico, antecedentes y Estado del Arte	48
Fase 2: Elaboración de diseño de mezcla de mortero utilizando HPT	48
Fase 3: Recolección de materia prima (hueso porcino)	49
Fase 4: Proceso de limpieza, trituración y desinfección del hueso porcino	50
Limpieza	50
Trituración	53
Fase 5: Ensayos de caracterización del hueso porcino triturado y del agregado fino convencional (Arena de Santo Tomás)	55
Caracterización de los materiales	55
Granulometría del Hueso Porcino Triturado.	57
Granulometría de la Arena de Santo Tomás.	59
Humedad.	62
Masa unitaria.	63
Impurezas orgánicas.	64
Densidad y absorción.	64

Agua	65
Fase 6: Elaboración de cubos de mortero	65
Equipos y herramientas	66
Procedimiento de elaboración del mortero	70
Análisis de resultados	76
Ensayos de los agregados	76
Granulometría del HPT	76
Humedad de los agregados	77
Masa unitaria de los agregados	78
Impurezas orgánicas de los agregados	78
Densidad y absorción de los agregados	78
Ensayos en el mortero	79
Comportamiento físico del mortero	79
Comportamiento mecánico del mortero	80
Porcentaje de aire ocluido y relación agua cemento	84
Conclusiones	89
Recomendaciones	91
Referencias	93

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1	Fluidez recomendada para diversos tipos de estructura y condiciones de colocación	28
Tabla 2	Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción	31
Tabla 3	Tipos de cemento portland	33
Tabla 4	Requisitos para arena normalizada	34
Tabla 5	Uso de materiales orgánicos como reemplazo de agregados	38
Tabla 6	Uso de osamenta como reemplazo de material cementante	40
Tabla 7	Métodos de limpieza y trituración del hueso	43
Tabla 8	Ensayos para agregados finos	46
Tabla 9	Cantidad de cubos de mortero a elaborar	46
Tabla 10	Cantidades de materiales componentes del mortero	48
Tabla 11	Dosificaciones para la mezcla de mortero para 9 cubos de acuerdo con el porcentaje de participación del HPT	49
Tabla 12	Materiales componentes del mortero	56
Tabla 13	Características del cemento utilizado	56
Tabla 14	Resistencia a la compresión del cemento utilizado	57
Tabla 15	Cantidades de HPT retenidos por tamiz utilizadas en la segunda tanda de cubos	58
Tabla 16	Resultados ensayo de granulometría de la Arena de Santo Tomás	61

Tabla 17 Datos y resultados del ensayo de humedad para la arena de Santo Tomás y el HPT	62
Tabla 18 Datos y resultados del ensayo de masa unitaria para la arena de Santo Tomás y de HPT	63
Tabla 19 Datos y resultados del ensayo de impurezas orgánicas para la arena de Santo Tomás y el HPT	64
Tabla 20 Datos y resultados del ensayo de densidad y absorción para la arena de Santo Tomás	65
Tabla 21 Resultados de resistencia a la compresión para todos porcentajes de reemplazo	80
Tabla 22 Promedio de los resultados de resistencia a la compresión para todos porcentajes de reemplazo	82
Tabla 23 Diferencia entre promedios de resultados de resistencia a la compresión respecto a la muestra con 0% de reemplazo	84
Tabla 24 Relación agua-cemento y porcentajes de flujo y aire para cada reemplazo	84
 Figuras	
Figura 1 Objetivos de desarrollo sostenibles relacionados	15
Figura 2 Resultado de búsqueda de "Sustainable construction" & "Material"	17
Figura 3 Producción anual de carne de cerdo en Colombia (Porkcolombia, 2021)	19
Figura 4 Estado inicial del hueso de cerdo comprado	50
Figura 5 Hueso hirviendo en agua con sal	51

Figura 6 Retiro de la carne superficial	51
Figura 7 Hueso sumergido en solución con Hipoclorito de Sodio	52
Figura 8 Lavado del hueso con agua	53
Figura 9 Ilustración del proceso de Trituración manual	54
Figura 10 Trituración en máquina de los ángeles	55
Figura 11 Ilustración del cemento gris empleado	57
Figura 12 Ilustración del Agregado fino empleado	59
Figura 13 Curva granulométrica de la Arena de Santo Tomás	62
Figura 14 Ensayo de impurezas orgánicas del HPT	64
Figura 15 Mezcladora	66
Figura 16 Moldes	67
Figura 17 Herramientas menores	67
Figura 18 Ilustración de la balanza usada	68
Figura 19 Mesa de flujo	69
Figura 20 Medidor de aire ocluido en el mortero de 1lt de capacidad.	69
Figura 21 Pesaje de Arena de Santo Tomás	70
Figura 22 Pesaje del cemento	70
Figura 23 Pesaje del agua	70
Figura 24 Mezclado de materiales	71
Figura 25 Ensayo de fluidez	72
Figura 26 Apisonado del mortero	73
Figura 27 Toma de medida contenido de aire	73

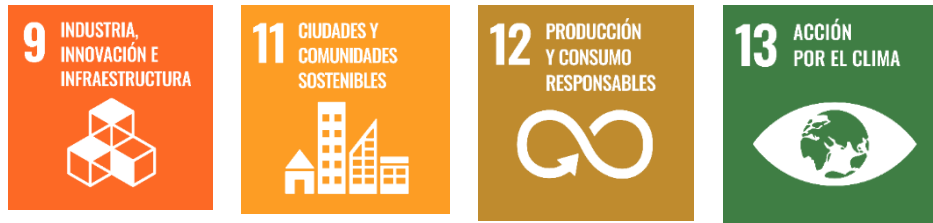
Figura 28 Llenado de moldes	74
Figura 29 Cubos dentro de los moldes en la cámara de curado	75
Figura 30 Curado de cubos luego de desmoldarse	75
Figura 31 Curvas de distribución granulométrica de los agregados	77
Figura 32 Variación del peso en los cubos de mortero de acuerdo con porcentaje de reemplazo de HPT	80
Figura 33 Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días	82
Figura 34 Contenido de aire en la mezcla de mortero por porcentaje de reemplazo	85
Figura 35 Fotografía tomada a los especímenes convencional	86
Figura 36 Fotografía a especímenes con reemplazo de HPT	87
Figura 37 Relación agua/cemento por porcentaje de reemplazo	88

Introducción

En el 2015, los Estados Miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) pactaron objetivos para el 2030 en los cuales, desde diversas áreas, se busca “poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad” (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015). En este sentido, la construcción es un factor en el que convergen varios de estos objetivos porque, si bien va ligado con el avance de las comunidades, tanto la metodología como la tecnología que se emplee pueden significar mayor o menor impacto hacia el medio ambiente.

Figura 1

Objetivos de desarrollo sostenibles relacionados



Nota: Fuente (Organización de las Naciones Unidas).

El noveno objetivo referente a infraestructura muestra a esta en su forma básica al evidenciar que “las carreteras, las tecnologías de la información y la comunicación, el saneamiento, la energía eléctrica y el agua, sigue siendo escasa en muchos países en desarrollo” (Naciones Unidas, 2015), lo cual significa que es necesaria la inversión en esta área. Sin embargo, si también se apunta a la sostenibilidad, se debe tener en cuenta que en las ciudades es donde se presenta mayor crecimiento económico, pero también se da “alrededor del 70 % de las emisiones de carbono mundiales y más del 60 % del uso de recursos” (Naciones Unidas, 2015), indicando así que se está dando un crecimiento que va en contracorriente con respecto a los demás objetivos, que son cuidar el medio ambiente y el clima, por lo que es necesario la búsqueda de alternativas.

Ahora bien, ya conociendo la relevancia de la construcción en el desarrollo y su impacto medio ambiental es pertinente hablar de sus más importantes protagonistas: cemento y concreto (Pinzón Sánchez, 2019).

Los primeros materiales cementantes se observaron en construcciones que datan entre el 7000 y 6000 a.C. y no fue hasta 1824 que se patentó el *Cemento Portland* obtenido a partir de caliza arcillosa y carbón calcinados. Sin embargo, este fue mejorado en 1845 con la fabricación

del Clinker, el cual es una mezcla de caliza y arcilla calcinada a altas temperaturas. Este material hace parte fundamental del proceso de fabricación del cemento que hoy en día se conoce (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 2013). Cabe resaltar que, al pasar al siglo XX, la industria del cemento comenzó a tener un auge y se impuso en las obras de ingeniería de tal manera que en la actualidad es el material industrializado de mayor consumo (Cementos La Union, 2015).

Sin embargo, la elaboración del cemento requiere la explotación de recursos naturales para la obtención de su materia prima (caliza, arcilla, entre otros)(Ochoa L. & Flores B., 1994) y un proceso de calcinación el cual emite gases de efecto invernadero, todo esto sin tener en cuenta que posteriormente será mezclado con agregados extraídos también de canteras y cantidades significativas de agua, tanto para obtener la mezcla (concreto o mortero fresco) como para su proceso de curado.

En este sentido, un concreto estándar puede estar compuesto de un 35% de arena, 45% de gravilla, un 10% de cemento y 10% de agua, lo que se podría traducir, por ejemplo, en que para la construcción de una casa mediana se utilizarían aproximadamente 200 Ton de arena y para un hospital unas 3.000 Ton, lo cual da lugar a intensivas extracciones de agregados en playas, minas, fondos de lagos u océanos que repercuten en la desestabilización de los ecosistemas naturales (Brut., 2019).

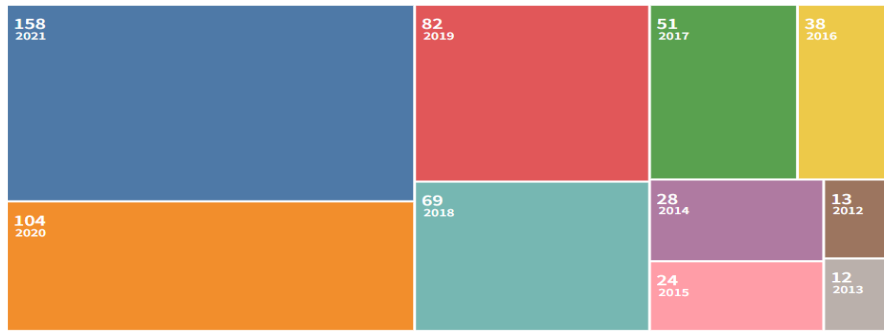
Debido a lo mencionado, la industria de la construcción ha incursionado en la experimentación con los cementos, morteros y concretos, de modo que ha dado lugar a materiales innovadores y sostenibles, iniciando con la creación de los aditivos, los cuales modifican las propiedades físicas de los morteros y concretos, con el objetivo de suplir

necesidades particulares en los proyectos, mejorando la calidad y características del producto (KHEME Chemical, s. f.). Estos han ayudado a lograr materiales novedosos como concretos antibacterianos, los cuales contienen fungicidas que inhiben el crecimiento de bacterias; morteros estabilizados, que pueden permanecer en estado plástico hasta por 36 horas; o concretos anticorrosivos, los cuales protegen el concreto en ambientes donde está expuesto a iones y cloruros (Revista En Obra, 2013).

Así mismo, desde la investigación se ha buscado crear materiales que además de cumplir estándares de calidad, sean materiales sostenibles, como ejemplo de ello se encuentra el cemento fosforescente, un cemento capaz de absorber e irradiar luz, este material resulta eficiente desde el punto de vista de recursos y energía (OVACEN, 2018). Adicionalmente se han evaluado alternativas como lo es el reemplazo de materiales convencionales del cemento, mortero o concreto por materiales reciclados, entre los que se puede encontrar la reutilización de escombros dentro de las mezclas (Agronet, 2021). Incluso, en la plataforma Web of Science, la cual es una base de datos de información científica, al buscar las palabras “Construcción sostenible” y “Materiales” aparecen un total de 597 resultados, entre los cuales en el 2021 se dieron 158 publicaciones al respecto.

Figura 2

Resultado de búsqueda de "Sustainable construction" & "Material"

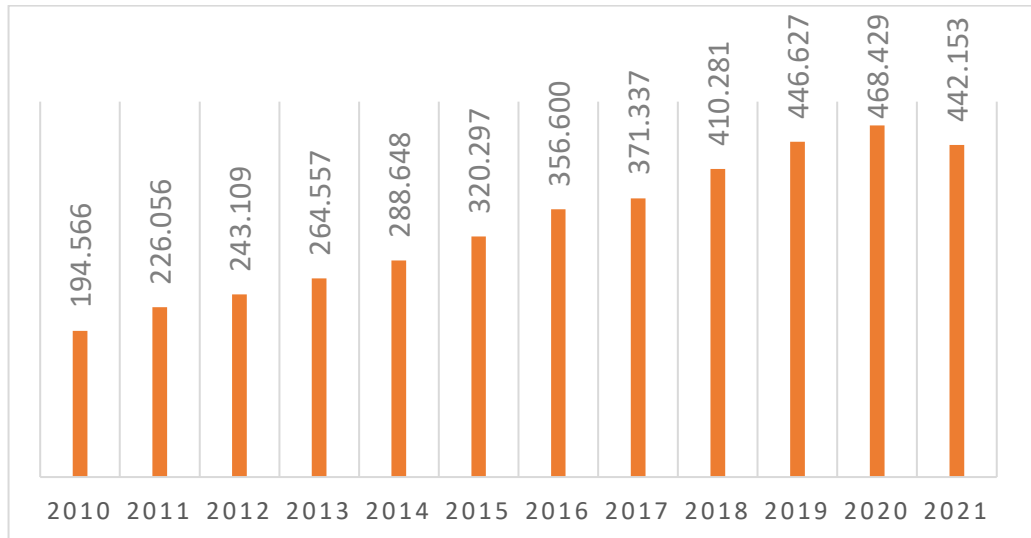


Nota: Fuente (*Web of Science, 2022*).

Por otro lado, el departamento del Atlántico (Colombia) en el 2020 se destacó en la producción de cerdo durante la recuperación económica luego de la pandemia del Sar Cov 2 (Mouthón, 2020) y durante la última década, como se puede observar en el *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, la producción porcina ha tenido un crecimiento importante, por lo que la utilización de subproductos de esta índole es pertinente (Porkcolombia, 2021).

Figura 3

Producción anual de carne de cerdo en Colombia (Porkcolombia, 2021)



Nota: Fuente (Porkcolombia, 2021).

Por ello, se puede decir que la búsqueda de opciones que permitan que el uso de estos importantes componentes de la construcción tenga un menor impacto ambiental es una realidad. Ahora bien, al tener en cuenta que la optimización de recursos también se trata del aprovechamiento de desechos extendiendo su ciclo de vida, es pertinente contemplar a alternativa del uso de osamenta porcina como reemplazo de componentes del mortero siendo este un subproducto asequible en el departamento del Atlántico.

Planteamiento del problema

En el mundo se llegan a generar aproximadamente 2.010 millones de toneladas de desechos sólidos de manera anual. El 11,49% de estos desechos son provenientes de América Latina y el Caribe (Banco Mundial, 2018), porcentaje en el cual Colombia tiene una participación del 5,02% (Monterrosa Blanco, 2019). Además, se prevé que para el 2050 la cantidad de desechos aumentará en aproximadamente un 70%, lo que dará lugar a un volumen cuantioso de 3.400 millones de toneladas de desechos anuales en todo el mundo (Banco Mundial, 2018).

En este sentido, se estima que en Colombia el 40% de la basura generada por los hogares es materia orgánica (Monterrosa Blanco, 2018), los cuales son desechos de origen vegetal y/o animal, entre los que se puede encontrar, restos de comida, residuos de papel o restos vegetales (Recytrans, 2013). Por su parte, los desechos de la carne y sus subproductos inician su producción en mataderos, y aumentan su cifra con la producción en los hogares, la generación de residuos es un hecho, por lo que es una necesidad medio ambiental y de salud pública que se realice un manejo eficiente de estos.

Dicho lo anterior, en el 2019 el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos registró cerca de 114 plantas de beneficio, desposte, desprese y acondicionadores de ganado porcino, que cumplían con los estándares sanitarios (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos, 2019). Los huesos que resultan de la producción de estas plantas pueden ser tratados de dos formas: la primera consiste en coserlo en marmitas para extraer los aceites presentes en ellos para posteriormente secarlos al ambiente, molerlos y obtener harina de hueso al vapor; la segunda técnica consiste en calcinar huesos frescos y secos para ser molidos

hasta obtener harina de hueso calcinado, siendo estos dos productos usados “generalmente en la fabricación de sales mineralizadas para la alimentación animal” (CONtexto Ganadero, 2014). La problemática radica en que para lograr procesar el residuo pueden llegar a necesitarse maquinarias costosas que, de no tenerse disponibles, llevan a los involucrados a depositarlos de manera inadecuada, generando un crisis ambiental y sanitaria (CONtexto Ganadero, 2014).

Por otro lado, en el sector de la construcción, específicamente en el proceso de fabricación tanto del cemento, como del concreto y el mortero, se debe extraer desde canteras materias primas como: caliza, arcilla, mineral de hierro, arena y yeso, lo cual resulta en problemas ambientales. En consecuencia, se ha buscado incluir otros materiales, alterando la mezcla convencional del concreto o mortero, como lo hicieron Mendoza, Aire, & Dávila en 2011, quienes incluyeron fibras de polipropileno en la mezcla del concreto; Rincón & Santiago en 2018 trabajaron con fibras de cabello humano en el concreto y Pérez & Vera en 2021, utilizaron escoria de horno y vidrio molido en reemplazo de agregado grueso y fino en el hormigón, esto con el objetivo de apuntar hacia materiales sostenibles que a su vez brinden buenas y mejores propiedades que los materiales convencionales.

Por su parte, dado que el departamento del Atlántico (Colombia) en el 2020 se destacó en la producción de cerdo durante la recuperación económica luego de la pandemia del Sar Cov 2 y que la sostenibilidad a través de la economía circular sugiere “la reutilización de los recursos locales” (Repsol, 2021) se hace pertinente evaluar el uso de subproductos de origen porcino en la construcción.

Así pues, la presente propone como material de reemplazo del agregado fino en el mortero el hueso porcino triturado (HPT), con el objetivo de validar el comportamiento que

exista en las mezclas y en lo concerniente a la resistencia de compresión. Siendo, entonces, un proyecto que pretende brindar conocimientos a través de la investigación de nuevos materiales aplicados al sector de la construcción, a través del estudio de las propiedades mecánicas de un material ecológico asequible en el departamento del Atlántico, para verificar la viabilidad de la inclusión de este en procesos constructivos, mejorando a su vez, la situación de contaminación generada por materiales constructivos tradicionales en el país.

Dado lo anterior, surge la siguiente pregunta:

¿Cómo es el comportamiento de la resistencia a la compresión de mezclas de mortero al reemplazar el agregado fino, en peso, por Hueso de Porcino Triturado en porcentajes previamente definidos, siguiendo los parámetros definidos en la Norma Técnica Colombiana?

Justificación

La construcción, además de ser indispensable para el desarrollo de la sociedad, es también una de las principales responsables en la generación de residuos y contaminación. Cada edificio y casa habitada produce una huella ecológica sobre el planeta, es decir, la estructura, en sus diferentes etapas (construcción, operación y demolición) consume una gran cantidad de recursos y produce residuos contaminantes (Susunaga Monroy, 2014).

Debido a lo anterior, la industria de la construcción se ha transformado en un sector regulado, de modo que ha buscado implementar medidas que mejoren el comportamiento medioambiental de las estructuras (Hernández Jaén, Hernández Martínez, & Maldonado Bandala, 2011). En este sentido, últimamente el sector ha apuntado a obtener concretos ecológicos, los cuales son productos donde “los áridos se sustituyan por elementos naturales o reciclados, que mantengan o mejoren las características de los materiales tradicionales y que a su vez contribuyan en la reducción de la contaminación” (Iturbe, 2019) por lo que es pertinente emular esto en el mortero.

La alternativa de hueso como material de reemplazo resulta llamativa debido a la composición de este, dado que a nivel microscópico el hueso contiene matriz osteoide, la cual está constituida en un 25% por agua, un 25% de fibras colágenas y en un 50% de sales minerales cristalizadas (Tortora & Derrickson, 2013). En la última mencionada, la sal más abundante es el Fosfato de Calcio, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, la cual al combinarse con otra sal mineral (el Hidróxido de Calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) forma cristales de Hidroxiapatita. Estas sales minerales inorgánicas le aportan dureza, rigidez y resistencia al hueso. Por otro lado, la flexibilidad está en relación a las fibras colágenas, las cuales se podrían comparar con las varillas de acero que refuerzan el concreto,

debido a que le proveen al hueso fuerza tensil o resistencia al estiramiento (Tortora & Derrickson, 2013).

Adicional a lo mencionado, en Colombia “el sector porcícola representa el 1,4% del PIB agropecuario y el 4,8% del PIB pecuario del país, aportando 2,6 billones de pesos en términos de producción” (Vanguardia, 2020) siendo que para agosto del 2020 se produjeron 218.708 toneladas de carne de cerdo, lo cual representa un aumento del 5,1% con respecto al mismo período del año anterior.

Dicho todo lo anterior, se evidencia que los residuos de la producción porcina son asequibles y puede disponerse de estos para nuevas propuestas que apunten a la economía circular, por lo que resulta interesante estudiar las propiedades que un residuo como el hueso puede aportar en las mezclas de mortero para su aplicación en la construcción.

Es importante mencionar que, el hueso bovino ha sido investigado como reemplazo de los agregados y como sustituto del material cementante en mezclas de concreto y mortero en estado triturado y calcinado. En este sentido, los resultados de dichas investigaciones (se mencionan a profundidad en 0).

Estado del arte) muestran que se tiene mejores resultados con menores porcentajes de reemplazo. Sin embargo, es necesario conocer a que se deben esas reducciones y si al trabajar con porcentaje pequeños se logra evitar la variación de la resistencia.

Por su parte, en cuanto al uso de hueso calcinado, deja incógnitas a nivel ambiental, debido a que sería necesario analizar si la contaminación del aire debido a los gases que resultan del proceso de calcinación genera un menor impacto ambiental que la explotación de recursos naturales para la extracción de los agregados en canteras. No obstante, dado que la meta es buscar soluciones a nivel ambiental que disminuyan el impacto ambiental esto no será analizado en el presente documento.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la resistencia a la compresión de mezclas de mortero aplicando reemplazos del agregado fino, en peso, por hueso porcino triturado siguiendo lo establecido en la normativa vigente colombiana.

Objetivos específicos

- Identificar las características físico-químicas del Hueso Porcino Triturado requeridas para las mezclas de mortero, como reemplazo del agregado fino.
- Identificar el efecto generado en la resistencia a la compresión del mortero al reemplazar porcentajes en peso del agregado fino por huesos porcinos triturado.
- Determinar la proporción óptima de reemplazo de Hueso Porcino Triturado que aporte el mejor valor de resistencia a la compresión en las mezclas de mortero.

Marco teórico-conceptual

Mortero

El mortero es una mezcla conformada por un material conglomerante (generalmente cemento, pero no tiene que serlo), agregados finos, agua y aditivos de ser necesarios (Crespo Escobar, 2010).

Usos del mortero

Entre los usos que se le da al mortero se encuentran los estructurales y no estructurales, para el primero, un ejemplo de su aplicación sería en la mampostería, al usarlo como mortero de pega o de relleno, y como ejemplo del segundo, se tiene su uso en el pañete, repellos o revoques. (Salamanca, 2001).

Propiedades del mortero estado plástico

Manejabilidad

Esta propiedad hace referencia a la facultad de ser trabajado, transportado y colocado fácilmente sin que pierda homogeneidad (Salamanca, 2001).

Para el mortero, la manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al grado de fluidez (Sánchez De Guzmán, 2001), característica que es medida a través de ensayos con la mesa de flujo y cuyo procedimiento se encuentra descrito en la NTC 111.

En la *Tabla 1* se puede apreciar el porcentaje de fluidez del mortero que se recomienda de acuerdo con el tipo de estructura y sistema de colocación.

Tabla 1

Fluidez recomendada para diversos tipos de estructura y condiciones de colocación

Consistencia	Fluidez %	Condición de colocación	Ejemplo de tipos de estructura	Ejemplo de sistema de colocación
Dura (seca)	80-100	Secciones sujetas a vibración.	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos.	Proyección neumática, con vibradores de formaleta.
Media (plástica)	100-120	Sin vibración.	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos.	Manual con palas y palustres.
Fluida (húmeda)	120-150	Sin vibración.	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos.	Manual, bombeo, inyección.

Nota: adaptado de " Tecnología del concreto y mortero"(Sánchez De Guzmán, 2001).

Retención de agua

Esta propiedad depende de la capacidad que tiene el mortero de mantener la plasticidad al ser expuesto o encontrarse en contacto con una superficie absorbente. La retención de agua es importante debido a que, si se mantiene alta, se evita la formación de grietas y la pérdida de resistencia (Sánchez De Guzmán, 2001).

Tiempo de fraguado

Este es el proceso en el cual el mortero pasa de estado plástico al endurecido, se pueden clasificar 3 tiempos de fraguado los cuales son: lento, normal y rápido. Los fraguados lentos son aquellos que demoran más tiempo en endurecer, los de fraguado normal son los que endurecen prácticamente con la velocidad de hidratación del cemento y los de tiempos de fraguado acelerado, son aquellos que endurecen en menor tiempo y adquieren mayor resistencia en tempranas edades (Osorio, 2003).

Contenido de aire

Este elemento se localiza en los poros no saturables de los agregados y entre componentes del mortero, bien puede encontrarse porque se queda atrapado durante el proceso de mezclado o bien puede ser intencionalmente incorporado con aditivos (Osorio, 2003).

De acuerdo con el contenido de aire de la mezcla se puede aligerar la masa endurecida y también puede darse un descenso en la resistencia.

Propiedades del mortero en estado endurecido

Retracción de secado

Esta propiedad tiende a aumentar con los altos contenidos de cemento, cuando se quiere mejorar dicha propiedad y evitar la aparición de grietas, es recomendable usar arena de textura rugosa y tener cuidado con el clima que se tiene al momento de colocar la mezcla (Gutiérrez De López, 2003).

Adherencia

Es la capacidad del mortero para responder monolíticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie sobre la

cual se coloca el mortero sea rugosa y tenga una absorción adecuada (Gutiérrez De López, 2003).

Resistencia mecánica

Esta propiedad tiene en cuenta especialmente la resistencia a la compresión, la cual depende de la relación agua/cemento y de la granulometría del agregado fino, esta última se establece por medio del módulo de finura el cual es determinado aplicando el ensayo descrito en la NTC 77 (Salamanca, 2001).

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica más importante y se utiliza para juzgar la calidad del concreto, esto debido a que la mayoría de las estructuras hechas en concreto son diseñadas bajo el supuesto de que solo resisten esfuerzos a compresión (Gomez Jurado Sarria & Sánchez De Guzmán, 1997)

Método de ensayo para el mortero. La forma de evaluar la resistencia a la compresión en morteros es mediante pruebas mecánicas de ensayo de cubos, para estos se toman muestras, se hacen especímenes y se fallan a diferentes edades, el procedimiento es descrito en la NTC 220 “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8mm de lado”.

Factores que influyen en la resistencia. Dentro de los factores que afectan la resistencia del mortero endurecido, independiente a la calidad y tipo de material que lo constituya, se encuentran los siguientes (Osorio, 2003):

1. Contenido de cemento y tipo de cemento
2. Relación agua/cemento
3. Contenido de aire

4. Tipo y dosificación de aditivo
5. Fraguado
6. Curado
7. Edad

Tipos de mortero de mampostería

De acuerdo con la Norma Sismo Resistente del 2010 en su título D, el mortero de pega de mampostería se puede clasificar en H, M, S y N teniendo en cuenta la resistencia a la compresión mínima a los 28 días y a la dosificación de sus materiales, tal como se observa en la *Tabla 2*.

Tabla 2

Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la compresión MPa	Flujo %	Retención mínima de agua	Cemento portland	Cal hidratada	Cemento para mampostería	Arena/material cementante	
							Min	Max
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	No aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	No aplica	2.25	3.0
				1	No aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.025 a	No aplica	2.5	3.2
				0.5	0.5	1	2.5	3.0
N	7.5	110-115	75%	1	0.5 a 1.25	No aplica	3.00	4.5
				0	No aplica	1	3.00	4.0

Nota: adaptado de "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 título D: Mortero de pega".

- Mortero tipo H:

Se utiliza en mampostería donde se presentan exigencias grandes de carga o áreas que están sometidas a efectos de abrasión

Se puede utilizar en mampostería estructural de acuerdo con instrucciones del diseñador («Tipos de Morteros para la construcción - Cementos Tequendama», s. f.).

- Mortero tipo M

Es usado para rellenar dovelas de mampostería estructural o unir unidades de mampostería («Tipos de Morteros para la construcción - Cementos Tequendama», s. f.)

- Mortero tipo S

Recomendado para pega de mampuestos, pañetes y revoque («Tipos de Morteros para la construcción - Cementos Tequendama», s. f.)

- Mortero tipo N

Recomendado para pega de mampuestos, pañetes y revoque, solo debe usarse en estructuras de capacidad mínima de disipación («Tipos de Morteros para la construcción - Cementos Tequendama», s. f.).

Materiales componentes del mortero

Cemento portland

Los cementos portland, son cementos hidráulicos, los cuales fraguan y endurecen debido a la reacción química que surge al contacto con el agua, dicha reacción es denominada hidratación, además, en la medida que dicha hidratación continúe, el concreto o mortero se vuelve más duro y resistente, por lo tanto, para cuidar esta continuidad, se deben tener en cuenta condiciones de temperatura y humedad (curado) favorables (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El cemento resulta básicamente de la pulverización del Clinker, el cual está compuesto de materiales calcáreos y arcillosos, además de otros materiales que contienen sílice, aluminio e hierro, que se procesan a altas temperaturas, para luego ser mezclados con yeso y formar el producto final (Kosmatka et al., 2004).

Los tipos de cemento que se contemplan en la *Tabla 3*, son los mencionados en la NTC 121 que tiene por título “especificaciones físicas y mecánicas del cemento portland”.

Tabla 3

Tipos de cemento portland

Tipos de cemento portland	Descripción
Cemento portland Tipo 1	Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
Cemento portland Tipo 1-M	Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.
Cemento portland Tipo 2	Es el destinado en general a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras en donde se requiere calor de hidratación.
Cemento portland Tipo 3	Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
Cemento portland Tipo 4	Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
Cemento portland Tipo 5	Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos
Cemento portland blanco	Es el que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca.

Nota: Adaptado de " Tecnología del concreto y mortero" (Sánchez De Guzmán, 2001).

Agregados

Los agregados son partículas incorporadas al concreto o mortero que ocupan un espacio y que en combinación con el cemento y el agua proporcionan resistencia mecánica en estado endurecido. Estos ocupan cerca del 60% y 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa), influyen en las propiedades de la mezcla tanto en estado plástico como endurecido, además funcionan como un relleno para reducir la pasta de cemento necesaria en la mezcla (Kosmatka et al., 2004).

Los agregados para el mortero de pega deben estar libres de materiales contaminantes o deleznales que puedan deteriorar las propiedades del mortero de pega (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

En el caso de la arena para que sea considerada apta para utilizar en ensayos de cemento hidráulico para morteros, esta debe cumplir con los requisitos de granulometría establecidos en la NTC 3937 que se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4

Requisitos para arena normalizada

Características	Arena 20-30	Arena Gradada
Gradación, porcentaje que pasa a través del tamiz		
1,18 mm (No. 16)	100	100
850 µm (No. 20)	85 a 100	
600 µm (No. 30)	0 a 5	96 a 100
425 µm (No. 40)		65 a 75
300 µm (No. 50)		20 a 30
150 µm (No. 100)		0 a 4

Nota: Adaptado de "Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico." (NTC 3937).

Agua

El agua utilizada en las mezclas debe encontrarse limpia y libre de sustancias como: aceite, ácidos, alcoholes, sales, materia orgánica, entre otras, que puedan dañar la mezcla o el refuerzo embebido en ellas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Este es un ingrediente fundamental debido a que participa en el proceso de lavado de agregados, en la preparación de la mezcla y en el proceso de curado. (Gomez Jurado Sarria & Sánchez De Guzmán, 1997)

Aditivos

Son ingredientes añadidos a la mezcla de concreto o mortero inmediatamente antes o durante su mezclado, estos se utilizan con el objetivo de mejorar las propiedades de las mezclas bien sea en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido, para hacer el concreto o mortero más adecuado a las necesidades o exigencias solicitadas y para que además cumplan los requisitos y especificaciones particulares de cada tipo de estructura. (Gomez Jurado Sarria & Sánchez De Guzmán, 1997)

Agentes aireantes. Durante los procesos de congelación y descongelación, se reduce la durabilidad del concreto endurecido debido a los esfuerzos internos que ese ciclo provoca, este impacto se mitiga al proporcionar una red de diminutos huecos o burbujas de aire en el hormigón para que de esa manera el agua cuente con mayor espacio para expandirse al momento de congelarse (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Reductores de agua. Para facilitar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco es necesario añadir a la mezcla más agua de la necesaria para la hidratación, sin embargo, este acto

puede afectar la calidad del producto final, por lo que los reductores de agua permiten mejorar la manejabilidad de la mezcla sin afectar las cualidades de esta (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Retardantes. Estos son utilizados para retrasar el proceso de fraguado inicial del hormigón, en los siguientes casos, por ejemplo: compensar el efecto de un clima cálido, permitir distancias largas de transporte o proporcionar el tiempo necesario para conseguir acabados especiales (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Aceleradores. Son utilizados para desarrollar resistencias iniciales en el hormigón a una velocidad mayor a la de un hormigón normal, estos se usan para: reducir tiempos de curado o aumentar la velocidad de ganancia de resistencia (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Hueso

Los huesos tienen como función brindar sostén a los músculos que lo rodean, este es una pieza dura y resistente, constituido por tejidos plásticos formados por complementos orgánicos e inorgánicos, específicamente se compone de un material impregnado con sustancias minerales, principalmente fosfato de calcio hidratado, fibras de colágeno que le brindan elasticidad y resistencia, además de cristales de sales que le dan dureza y rigidez (De Elorza M, 2004).

Los huesos son la materia prima para elaborar grasas y gelatinas animales para consumo humano, grasas industriales o harinas de carne o hueso para piensos animales («Alfa Laval - Procesado de huesos», s. f.).

Subtipos de tejido óseo

El hueso no es completamente sólido, las regiones de un hueso pueden clasificarse como esponjosas o compactas, Tortora & Derrickson (2013) afirman que “aproximadamente el 80% del esqueleto está formado por hueso compacto y el 20% por hueso esponjoso”.

Tejido óseo compacto. El tejido óseo compacto tiene pocos espacios y es el componente más sólido del tejido óseo proporciona protección y soporte, además ofrece resistencia a la tensión causada por el peso o el movimiento (Tortora & Derrickson, 2013).

Tejido óseo esponjoso. El termino esponjoso hace referencia a la apariencia esa parte del hueso, el hueso esponjoso está dispuesto en una red irregular de columnas delgadas a las cuales se les denomina trabéculas y los espacios entre estas hacen que el hueso sea liviano (Pachón Rojas & Cardenas Segura, 2007).

Estado del arte

Existen investigaciones relacionadas con el uso de osamentas como parte del concreto y mortero, ya sea de reemplazo de un componente o como un adicional, por lo cual, en este apartado se van a mostrar dichos estudios desde distintas perspectivas.

Uso de materiales orgánicos como reemplazo de agregado

Dentro de lo encontrado en la literatura el hueso triturado o calcinado, así como otros materiales orgánicos como fibras de cabello humano o cascaras de coco, han sido usados como reemplazo de porcentajes de la mezcla como agregado fino o grueso. Dichos estudios hicieron un reemplazo partiendo de unos porcentajes supuestos y testeándolos hasta determinar, dentro de dichos porcentajes, cuál era el que mostraba un comportamiento similar o mejor al del concreto o mortero convencional en pruebas relacionadas con la resistencia a la compresión. Dado lo anterior a continuación se mostrará la *Tabla 5* en la que se relacionan los parámetros usados y sus resultados obtenidos por cada autor:

Tabla 5

Uso de materiales orgánicos como reemplazo de agregados

Autor y año de publicación	Tipo de mezcla analizada	Tipo de agregado reemplazado	Porcentajes	Metodología	Resultados
Moya Heredia et al., 2018	Concreto	Fino	5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de hueso triturado.	63 cilindros ensayados a compresión utilizando las edades de 7, 14 y 28 días. Ensayando 3 por cada edad y porcentaje de reemplazo.	El 5% de hueso triturado es 0.21% más ligero que el hormigón convencional, debido a que el hueso es menos denso que la arena. Porcentajes menores o iguales al 5% pueden obtener resistencias inclusive mayores a la de la muestra patrón.

Moya Heredia, Guamán Moromenac ho, & Torres Cueva, 2019	Concreto	Fino	8%, 5%, 4% y 3% de hueso triturado.	105 cilindros ensayados a compresión a distintas edades (7, 14 y 28 días), ensayando 21 por porcentaje.	A los 28 días se logró determinar que la mezcla con 8% de hueso triturado es la que más se aproxima a los resultados de la mezcla base, con una diferencia de 5,02 MPa.
Ardila Barreto & Echeverry Arias, 2018	Concreto	Grueso	10%, 20% y 30% de hueso bovino largo triturado.	Se realizó un diseño de mezcla a través de un método gráfico y se ensayaron 9 cilindros por edad según la norma NTC-1377.	Los esfuerzos a compresión alcanzados por los cilindros con el 10% de modificación del agregado, eran inferiores a los conseguidos por las muestras del concreto convencional, sin embargo, alcanzaron la resistencia de diseño (21 MPa).
Galvez Escalante, 2018	Mortero	Fino (Arena fina y gruesa)	10%, 20%, 30%, 40% y 50% de hueso calcinado.	Uso de probetas cúbicas de 5 cm, curadas en una solución de Hidróxido de calcio y ensayadas a los 28 días con huesos calcinados a una temperatura de 750°C 2h y molidos.	Consiguieron la relación óptima con una relación cemento:arena de 1:3 tanto para arena fina como arena gruesa, con 20% de reemplazo, obteniendo unas resistencias a la compresión de 283 y 372 kg/cm ² respectivamente.
Petrounias et al., 2021	Concreto	Agregado grueso y adición de fibras de cabello humano.	Cabello humano (longitud 15mm) fue de 1.5% por volumen. Los huesos se sustituyen de acuerdo con el tamaño es decir 4.45-9.5 y 9.5-19.1 mm eran hueso y 2.00-4.75mm eran calizas.	Se analizó el comportamiento mecánico en muestras de concreto que contenían hueso de cabras y ovejas con o sin imprimación de cuarzo, en algunas mezclas con cabello humano también con o sin imprimación de cuarzo.	Los huesos y cabellos con imprimación de cuarzo hacen aumentar artificialmente la micro rugosidad, aumentando la adherencia y cohesión. También reduce la capacidad de los agregados de absorber agua Las muestras con hueso y cabello humano imprimado tuvieron un buen comportamiento de resistencia a la

					compresión, con un valor de 29 MPa.
Natarajan, Ramalingas ekar, Palanisamy, & Ashokan, 2022	Concreto liviano	Agregado grueso y adición de fibras de sisal	Se utilizaron las cascaras de coco con tamaño de 12.5 y 4.75 mm para el agregado grueso y se agregó fibra de sisal al concreto en base al peso del cemento en un 1, 2, 3, 4 y 5%.	Se evaluó la resistencia a la compresión utilizando cubos de concreto de 150mm.	Se observó que al aumentar la porción de fibra de sisal hasta un 3% la resistencia aumentaba, además en dicho porcentaje alcanza la máxima resistencia a la compresión que fue de 37.8 MPa incrementando la resistencia en un 5%.

Nota: Elaboración propia.

Uso de osamentas como reemplazo de material cementante

El hueso también ha sido probado en forma calcinada y pulverizada como reemplazo de material cementante, algunos artículos que tratan estos ensayos se muestran a continuación.

Tabla 6

Uso de osamenta como reemplazo de material cementante

Autor y año de publicación	Tipo de mezcla analizada	Porcentajes	Metodología	Resultados
Mora Samacá, 2019	Concreto y mortero	10%, 15% y 20%, variando las temperaturas de hueso calcinado a una temperatura máxima de 1200°C.	Hueso obtenido a través de la incineración, convirtiendo el hueso en un material puzolánico.	Las pruebas a compresión realizadas en especímenes con un 10% de hueso calcinado a 1200°C por una hora, llegan a superar la resistencia de la pasta pura.
Ramya, Mercy	Concreto	20%, 30% y 40% del peso del cemento se reemplaza con polvo	Ensayos de resistencia a compresión de	Las muestras con reemplazo parcial de cemento de 20 y 30 %

Shanthi, & Suji, 2019		de hoja de plátano (BLP) y polvo de hueso de ganado (CBP).	probetas hechas con porcentajes de reemplazo del material cementante por la combinación de BLP y CBP.	con BLP+CBP lograron obtener la resistencia objetivo a los 14 días y 28 días respectivamente y la muestra con 20% de reemplazo superó la resistencia de la muestra patrón a los 28 días.
Anwar et al., 2019	Concreto liviano	5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo de cemento por ceniza de hueso animal y 100% de reemplazo de agregado grueso por piedra pómez.	Se ensayó a compresión 9 cubos de concreto por cada porcentaje de reemplazo, 3 por cada edad, las cuales fueron 7, 14 y 28 días.	La resistencia disminuye con el aumento en el reemplazo de cemento por ceniza de hueso. El 5% de reemplazo puede llegar a utilizarse en la construcción debido a que la diferencia entre la resistencia a la compresión de este y del hormigón convencional liviano resultó ser de 2.06 N/mm ² .
Izquierdo, Izquierdo Soto, & Ramalho, 2018	Concreto	Reemplazos de 5%, 10%, 15% y 20% con relaciones agregado: cemento (a/c) de 15, 10 y 6.	El residuo orgánico fue separado de los residuos sólidos y pasado por un triturador. Fue transferido a una cámara donde se le aplicó productos químicos como cal virgen y cloro para eliminar los residuos. La masa resultante se llevó al horno a una temperatura de 300°C. Se convirtió en polvo mediante sincronización en un molino de aire	Las mezclas con una relación a/c de 6 con 5% y 10% de polvo residual orgánico y las muestras con una relación a/c de 10 con un reemplazo de 10% mostraron mayor resistencia a la compresión que el concreto de referencia. El resultado fue un concreto más denso, de menor absorción y vacíos. En las mezclas ricas en cemento, se observó un mejor comportamiento mecánico del hormigón. Por lo tanto, el correcto ordenamiento del polvo permite rellenar los

			comprimido durante 20 minutos.	vacíos y disminuir los poros de la pasta de cemento.
Pedraza Acevedo, Riveira Iguarán, & Velásquez Vega, 2017	Concreto	Reemplazo del 10%, 15% y 20% de cemento por hueso bovino calcinado a temperaturas de 600°C, 900°C y 1200°C por 1 y 2 horas.	Ensayar la resistencia a la compresión, a edades de 7, 14 y 28 días. Elección del porcentaje, la temperatura y el tiempo de calcinación de material, que arroje la mayor resistencia en el ensayo de compresión.	Aumento temprano en la resistencia a la compresión en la pasta de cemento y en el concreto hidráulico, como resultado del reemplazo del 10% de cemento por hueso bovino calcinado a una temperatura de 1.200°C durante 1 hora.
Falade, Ikponmwosa, & Fapohunda, 2014	Concreto	Reemplazos de 5%, 10%, 15% y 20% de cemento con hueso pulverizado en vigas de concreto.	Se adoptaron los siguientes parámetros de diseño de la mezcla: una relación de ligante (cemento y hueso pulverizado): arena de 1: 3; una relación de agua; ligante de 0,5 y una dilución de agente espumante de 1:25.	La rigidez no se ve afectada por la inclusión de hueso pulverizado en la mezcla hasta 15% de reemplazo de cemento, y tampoco el patrón de deflexión de las secciones no agrietadas de los especímenes afectados por la inclusión de hueso pulverizado.
Verma, 2008	Concreto	Sustitución del 1,5%, 3%, 4,5%, 6%, 7,5%, 9%, 10,5% de cemento por polvo de hueso.	Se construyeron 48 cubos de molde de tamaño 150x150x150 mm, probando su resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.	Al curar durante 28 días, la muestra con 7,5% de reemplazo de cemento por polvo de hueso logró la máxima resistencia a la compresión.

Nota: Elaboración propia.

Limpieza y trituración del hueso

Ahora bien, al ser el hueso un objeto que tiene componentes orgánicos la limpieza es crucial para que dichos componentes no afecten posteriormente la mezcla en la que este se va a incorporar. Por lo cual se describirá (según los autores que destacan por profundizar en dicho aspecto) el proceso de limpieza y trituración del hueso.

Tabla 7

Métodos de limpieza y trituración del hueso

Autor y año de publicación	Tipo de agregado remplazado	Limpieza	Sustancias utilizadas para limpieza	Triturado	Observaciones
Moya Heredia et al., 2018	Fino	Retiro de materia orgánica con cuchillos.	Ninguna.	Se extendieron sobre una superficie plana y regular y se procedió a pasar 10 veces un rodillo compactador de 9.2 Toneladas, hasta conseguir una apropiada granulometría para luego triturar con Maquina de los Ángeles usando 12 esferas y 2.000 revoluciones.	
Moya Heredia et al., 2019	Fino	Cortar en pedazos pequeños, limpiar, hervir por 6 horas con detergentes. Secar por 15 días y verificar que estén limpios. Repetir proceso de ser necesario.	Detergente.	Trituración con rodillo compactador de 12 Ton (15 veces), tamizar #4 y lo retenido triturar en M. de los ángeles con 1.000 revoluciones.	
Ardila Barreto & Echeverry Arias, 2018	Grueso	Extracción de medula ósea sometiendo el hueso a agua caliente de 5 a 10 minutos, esto para debilitar la grasa y	Agua caliente y cloro.	La trituración se hizo colocando los huesos en una manta y tapándolos por completo, para luego con un mazo golpearlo, todo esto sobre el suelo.	No todos los huesos se pueden limpiar completamente debido a que la forma del hueso dificulta la

carne adherida, así mismo con un cuchillo se remueve la carne y cartílagos.	Se golpeaban los huesos con ayuda del mazo a tal punto de obtener partículas que a simple vista no sobrepasaran el tamaño de 1 pulgada (1 in).	accesibilidad para limpiarlo por medio del procedimiento descrito.
Luego de triturado se sumergió en cloro.		

Nota: Elaboración propia.

De lo anterior es pertinente resaltar que los procesos de limpieza descritos no fueron iguales y tampoco rigurosos por lo cual se pueden esperar fallas en las mezclas obtenidas.

Diseño metodológico

Con el propósito de desarrollar la presente investigación, la cual es de tipo cuantitativa experimental, se propone el siguiente planteamiento metodológico:

Fase 1: Investigación del marco teórico, antecedentes y Estado del Arte.

En esta etapa se realizará la consulta de investigaciones relacionadas con alternativas de materiales en mezclas de morteros y concreto, a través de lecturas bibliográficas y bases de datos como Science Direct y Scopus, además de utilizar motores de búsqueda especializada como Google Académico, revistas científicas, repositorios de otras universidades, entre otros.

Fase 2: Elaboración de diseño de mezcla de mortero utilizando HPT.

Se seguirán los parámetros establecidos en la NTC 220 *“Determinación de la resistencia de los morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado”*, aplicando reemplazos (en peso) del agregado fino por hueso porcino triturado en porcentajes de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10% cumpliendo con las respectivas exigencias granulométricas establecidas en la NTC 3937.

Fase 3: Recolección de materia prima (hueso porcino)

Se realizarán consultas y visitas a carnicerías situadas en Barranquilla y Baranoa, ubicadas en el departamento del Atlántico (Colombia), con el fin de disponer de huesos porcinos que estos generen para el desarrollo de los ensayos.

Fase 4: Proceso de limpieza, trituración y desinfección del hueso porcino

En este punto se pretende primero retirar la materia orgánica visible en el hueso porcino utilizando cuchillos. Posterior a esto, se procederá a triturar el material cubriéndolo con una manta y utilizando un mazo. Una vez realizado este procedimiento, se sumergirá el material

obtenido 7 horas en una solución de agua y cloro con el fin de eliminar la materia orgánica que sigue presente en el material.

Fase 5: Ensayos de caracterización del hueso porcino triturado y del agregado fino convencional.

Con el fin de verificar el cumplimiento de las exigencias normativas del HPT como reemplazo del agregado fino dentro de la mezcla de mortero, se procederá con el desarrollo de los siguientes ensayos.

Tabla 8

Ensayos para agregados finos

Ensayos los agregados finos en el mortero.	Norma Técnica Colombiana
Ensayo para determinar densidad y absorción del agregado fino.	NTC-237
Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.	NTC-127
Análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.	NTC-77
Humedad de agregados.	NTC-1776
Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado.	NTC-92

Nota: Elaboración propia.

Fase 6: Elaboración de cubos de mortero

Se elaborarán 162 cubos distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 9

Cantidad de cubos de mortero a elaborar

Porcentaje de reemplazo de agregado fino por HPT	Edades de ensayo (días)		
	7	14	28
0%	9	9	9
2%	9	9	9

4%	9	9	9
6%	9	9	9
8%	9	9	9
10%	9	9	9
Totales		162	

Nota: Elaboración propia.

Fase 7: Realización de ensayo de resistencia a la compresión

Una vez fabricadas las muestras indicadas anteriormente se procederá con la evaluación de las resistencias a la compresión de los cubos de mortero a las edades de los 7, 14 y 28 días.

Fase 8: Análisis de resultados y conclusiones

Basados en los resultados, se realizará un análisis de la resistencia obtenida en cada uno de los diseños de mezclas de morteros aplicados, con el fin de validar el comportamiento que este experimente con diferentes porcentajes de reemplazo identificados previamente.

Desarrollo experimental

Fase 1: Investigación del marco teórico, antecedentes y Estado del Arte

Se realizó la búsqueda en las bases de datos, encontrando investigaciones en las que se hacía reemplazos de los agregados o del cemento por hueso de ganado calcinado, pulverizado o triturado en mezclas de concreto y mortero. Con la anterior información se construyó el estado del arte (ven en 0), el cual fue la base para el presente proyecto de investigación.

Fase 2: Elaboración de diseño de mezcla de mortero utilizando HPT

La NTC 220 “*Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado*” (ICONTEC, 2008) establece las porciones en masa para formar el mortero, esta relación se encuentra compuesta por 1 parte de cemento y 2,75 partes de arena. Para conocer la cantidad de agua se debe aplicar el ensayo de fluidez siguiendo el procedimiento establecido en la NTC 111 “*Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico*” (ICONTEC, 2021), para utilizar los mililitros de agua que producen una fluidez de $110 \pm 5 \%$, esto debido a que los porcentajes de reemplazo de arena por HPT hacían variar la relación agua/cemento de la mezcla.

Tabla 10

Cantidades de materiales componentes del mortero

Material	9 cubos
Cemento, gr.	800
Arena gr.	2200
Agua, ml.	Ensayo de fluidez

Nota: Adaptado de “determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado” (NTC 220).

En cuanto a la dosificación de la mezcla teniendo en cuenta los porcentajes de reemplazo de agregado fino por HPT, se tiene la Tabla 11. Se debe tener en cuenta que las cantidades se triplican debido a que se están analizando 3 edades (7, 14 y 28 días).

Tabla 11

Dosificaciones para la mezcla de mortero para 9 cubos de acuerdo con el porcentaje de participación del HPT

Porcentaje	Arena Santo Tomás, gr.	HPT, gr.
0%	2200	0
2%	2156	44
4%	2112	88
6%	2068	132
8%	2024	176
10%	1980	220

Nota: Elaboración propia.

Fase 3: Recolección de materia prima (hueso porcino)

El material fue comprado en un restaurante ubicado en el municipio de Baranoa llamado “La Porchetta”, este establecimiento proporcionó el material en el estado en el que se muestra a continuación:

Figura 4

Estado inicial del hueso de cerdo comprado



Nota: Fuente (Autores).

Fase 4: Proceso de limpieza, trituración y desinfección del hueso porcino***Limpieza***

El estado inicial del hueso corresponde al que se muestra en la Figura 4, por lo que se realizó el siguiente procedimiento de limpieza, para el cual tomamos como referencia el procedimiento establecido por Ardila & Echeverry en 2018.

1. Se cocinó el hueso por 1 hora en agua hirviendo.

Figura 5

Hueso hirviendo en agua con sal



Nota: Fuente (Autores).

2. Se removió el material orgánico visible con cuchillos.

Figura 6

Retiro de la carne superficial



Nota: Fuente (Autores).

3. Se dejó el hueso en inmersión por 7 horas en una solución de Hipoclorito de Sodio y agua emulando proceso de Ardila & Echeverry extendiendo el tiempo de inmersión, en proporción 1:12. Se decidió duplicar la porción que se utiliza para la limpieza de baños y cocinas debido a que era una porción con gran concentración de Hipoclorito de Sodio.

Figura 7

Hueso sumergido en solución con Hipoclorito de Sodio



Nota: Fuente (Autores).

4. Se realizó un enjuague con abundante agua limpia.

Figura 8

Lavado del hueso con agua



Nota: Fuente (Autores).

Trituración

El proceso de triturado del hueso llevado a cabo para la obtención de la granulometría esperada es el que se describe a continuación.

- El material fue triturado manualmente dejando piezas de aproximadamente 3 cm máximo con el objetivo de poder controlar el tamaño de las partículas obtenidas y procurando que las estas fueran lo más pequeñas posible.

Figura 9

Ilustración del proceso de Trituración manual



Nota: Fuente (Autores).

- Se llevó el material al horno por 24 h, luego se trituró en la máquina de los ángeles en pequeñas porciones para posteriormente ser colocado nuevamente en horno por 24 h para su tamizado. Cabe resaltar que el material era dejado por 1 h para obtener material de los tamices 30 y 40, y por 2 horas para obtener material en su mayoría retenido en los tamices 50 y 100. En este punto se lavó y secó la maquina un día antes con el objetivo de retirar la grasa proveniente de las trituraciones anteriores y evitar la acumulación de esta en el nuevo material.

Figura 10

Trituración en máquina de los ángeles



Nota: Fuente (Autores).

Fase 5: Ensayos de caracterización del hueso porcino triturado y del agregado fino convencional (Arena de Santo Tomás)***Caracterización de los materiales***

Los materiales utilizados para la elaboración de cubos de mortero fueron proporcionados por la empresa Ultracem S.A.S., los cuales consistieron en cemento de uso general y un agregado fino convencional proveniente de la cantera Santo Tomás, el cual por su asequibilidad es utilizado en la industria de construcción del Departamento del Atlántico (Colombia).

Para llevar a cabo la producción de los cubos se siguió el procedimiento y requisitos establecidos en la NTC 220 “*Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado*” (ICONTEC, 2008). A continuación, se relacionan los materiales empleados en la elaboración del mortero utilizado en este programa experimental

Tabla 12*Materiales componentes del mortero*

Materiales	Procedencia	Aplicación
Cemento de tipo uso general (UG)	Ultracem S.A.S.	Cementante
Arena fina	Santo Tomás	Agregado fino 1
Hueso Porcino Triturado	Porchetta (Baranoa)	Agregado fino 2
Agua de grifo	Triple A S.A. E.S.P.	Ligante

Nota: Elaboración propia.

Por su parte, en la presente investigación se utilizó un cemento gris de tipo UG (uso general), el cual fue suministrado por Ultracem S.A.S. y cumple con los requisitos establecidos en la NTC 121 “*Cemento portland. Especificaciones físicas y mecánicas.*” (ICONTEC, 2014). De acuerdo con la ficha técnica del producto, este cemento cuenta con las características presentadas en la *Tabla 13* y *Nota:* Adaptado de “Ficha técnica del cemento Ultracem gris de tipo UG”.

Tabla 14.**Tabla 13***Características del cemento utilizado*

Parámetro de control	Método de ensayo	Especificación NTC 121	Especificación Ultracem
Contenido de aire en volumen, %	NTC 224	Max 12%	Max 12%
Finura (permeabilidad de aire), cm ² /g	NTC 33	-	-
Finura en tamiz N° 325 (45 m), %	NTC 294	-	-

Expansión en autoclave, %	NTC 107	Max 0.8%	Max 0.8%
Expansión barra de mortero, 14 días, %	NTC 4927	Max 0.02%	Max 0.02%

Nota: Adaptado de “Ficha técnica del cemento Ultracem gris de tipo UG”.

Tabla 14

Resistencia a la compresión del cemento utilizado

Resistencia a la compresión	Especificación NTC 121	Especificación Ultracem S.A.S.
1 día, PSI	-	Mín. 1200
3 días, PSI	Mín. 1160	Mín. 1890
7 días, PSI	Mín. 2176	Mín. 2900
28 días, PSI	Mín. 3481	Mín. 4060

Nota: Adaptado de “Ficha técnica del cemento Ultracem gris de tipo UG”.

Figura 11

Ilustración del cemento gris empleado



Nota: Fuente (Ultracem S.A.S.).

Granulometría del Hueso Porcino Triturado. Para cumplir con los requerimientos de la NTC 3937 “Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico” (ICONTEC, 2007), el

HPT pasó iterativamente por el proceso de trituración, descrito anteriormente, y el horno de tal forma que resultara un material manejable para el proceso de tamizado.

En este sentido, se recolectó el material retenido en los tamices teniendo en cuenta los intervalos de porcentajes pasantes mencionados en la norma y los porcentajes de reemplazo. A continuación, se muestra la tabla con las cantidades requeridas para cada tanda de cubos de acuerdo con el porcentaje de reemplazo.

Tabla 15

Cantidades de HPT retenidos por tamiz utilizadas en la segunda tanda de cubos

Tamiz	Porcentaje pasa (NTC 3937)		Porcentaje retenido		Porcentaje buscado	2% (gr)	4% (gr)	6% (gr)	8% (gr)	10% (gr)	Total (gr)
16	100%	100%	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0
30	96%	100%	4%	0%	4%	5,28	10,56	15,84	21,12	26,4	79,2
40	65%	75%	31%	25%	31%	40,92	81,84	122,76	163,68	204,6	613,8
50	20%	30%	45%	45%	45%	59,4	118,8	178,2	237,6	297	891
100	0%	4%	20%	26%	20%	26,4	52,8	79,2	105,6	132	396
200	0%	0%	0%	4%	0%	0	0	0	0	0	0
Total (gr)						132	264	396	528	660	1980

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Cabe resaltar que, se tomó como referencia el límite inferior de porcentajes pasantes de la NTC 3937 “*Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico*” (ICONTEC, 2007) como granulometría para el HPT.

Del mismo modo al agregado obtenido se le realizaron una serie de ensayos entre los cuales está Densidad y Absorción, Masa unitaria, Impurezas orgánicas y Humedad usando la normativa colombiana y obteniendo los resultados descritos a continuación.

Granulometría de la Arena de Santo Tomás. El agregado fino utilizado fue arena proveniente del municipio de Santo Tomás (Atlántico), suministrada a través de Ultracem S.A.S. Se decidió utilizar un agregado comúnmente vendido en ferreterías y además sugerido y utilizado por la empresa cementera para la realización de los ensayos de resistencia a la compresión.

Figura 12

Ilustración del Agregado fino empleado



Nota: Fuente (Autores).

Se tomó una muestra de 1000 g de Arena de Santo Tomás para la realización del ensayo descrito en la NTC 77 “*Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*” (ICONTEC, 1994) por medio del cual se obtuvieron los resultados que se presentan en la .

Tabla 16 y el

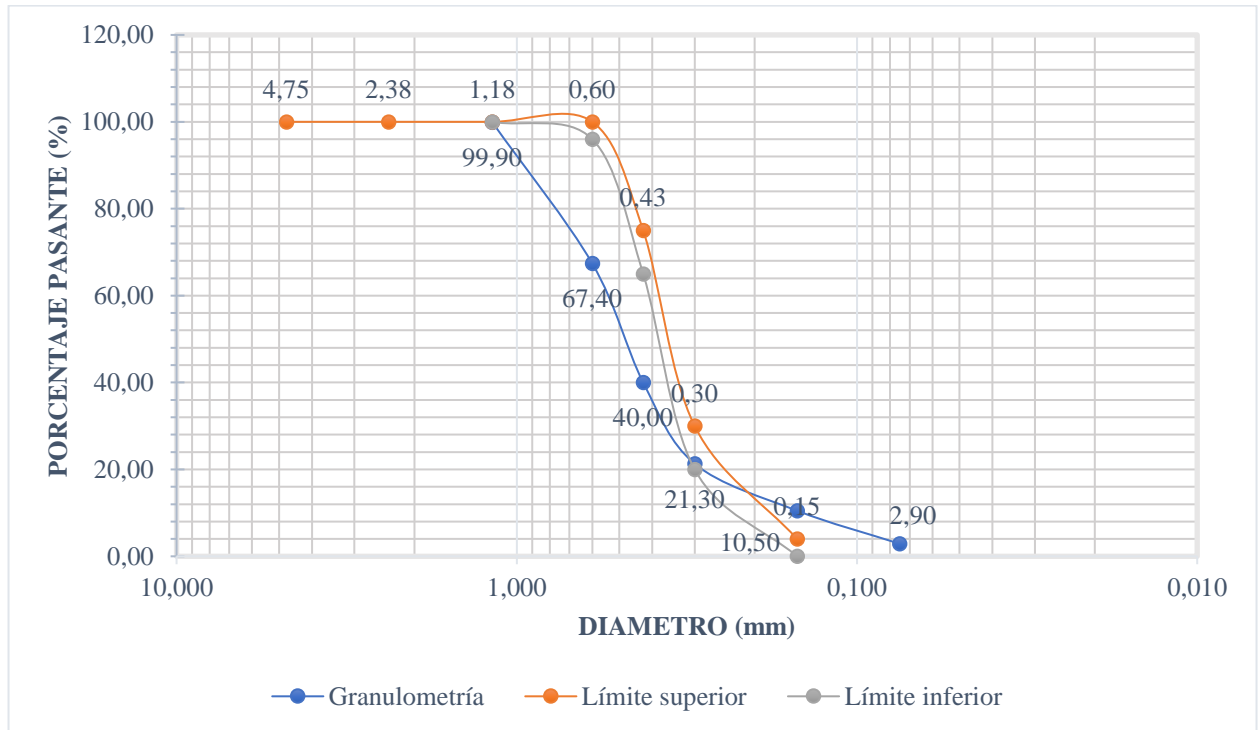
*Figura 13.***Tabla 16***Resultados ensayo de granulometría de la Arena de Santo Tomás*

Nro. de tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasante	NTC 3937	
						Límite inferior	Límite superior
4	4,750	0,0	0,00	0,00	100,00	100	100
8	2,380	0,0	0,00	0,00	100,00	100	100
16	1,180	1,0	0,10	0,10	99,90	100	100
30	0,600	325,0	32,50	32,60	67,40	96	100
40	0,425	274,0	27,40	60,00	40,00	65	75
50	0,300	187,0	18,70	78,70	21,30	20	30
100	0,150	108,0	10,80	89,50	10,50	0	4
200	0,075	76,0	7,60	97,10	2,90	0	0
Fondo	-	29,0	2,90	100,00	0,00	0	0
Masa total (g)		1000,0					

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Figura 13

Curva granulométrica de la Arena de Santo Tomás



Nota: Fuente (Elaboración propia).

Humedad.

Tabla 17

Datos y resultados del ensayo de humedad para la arena de Santo Tomás y el HPT

DATOS TÉCNICOS		
Norma	NTC 1776 – Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados	
Tipo de agregado	Arena de Santo Tomás	Hueso porcino triturado
Fecha	16/12/2021	14/12/2021
Muestras	3	3
DATOS OBTENIDOS		
Peso húmedo muestra 1, g.	500	500

Peso húmedo muestra 2, g.	500	500
Peso húmedo muestra 3, g.	500	500
Peso seco muestra 1, g.	488	478
Peso seco muestra 2, g.	486	479
Peso seco muestra 3, g.	487	478
RESULTADOS		
Humedad 1, %.	2,46	4,603
Humedad 2, %.	2,88	4,384
Humedad 3, %.	2,67	4,603
Humedad promedio, %.	2,67	4,530

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Masa unitaria.

Tabla 18

Datos y resultados del ensayo de masa unitaria para la arena de Santo Tomás y de HPT

DATOS TÉCNICOS		
Norma	NTC 92 – Método de ensayo para determinar la masa unitaria y los vacíos entre partículas de los agregados.	
Tipo de agregado	Arena de Santo Tomás	Hueso porcino triturado
Fecha	16/12/2021	14/12/2021
Muestras	2	2
DATOS OBTENIDOS		
Masa del molde, kg.	4,147	4,147
Masa del agregado con molde (suelto), kg.	5,418	4,706
Masa del agregado con molde (compacto), kg.	5,577	4,904
Volumen del molde, m ³ .	0,000926	0,000926
Gravedad específica aparente		
Densidad del agua, kg/ m ³ .	998	998
RESULTADOS		
Masa unitaria suelta, kg/ m ³ .	1373,308	603,996
Masa unitaria compacta, kg/m ³ .	1545,107	817,934

Contenido de vacíos, %.	48,10	62,00
-------------------------	-------	-------

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Impurezas orgánicas.

Tabla 19

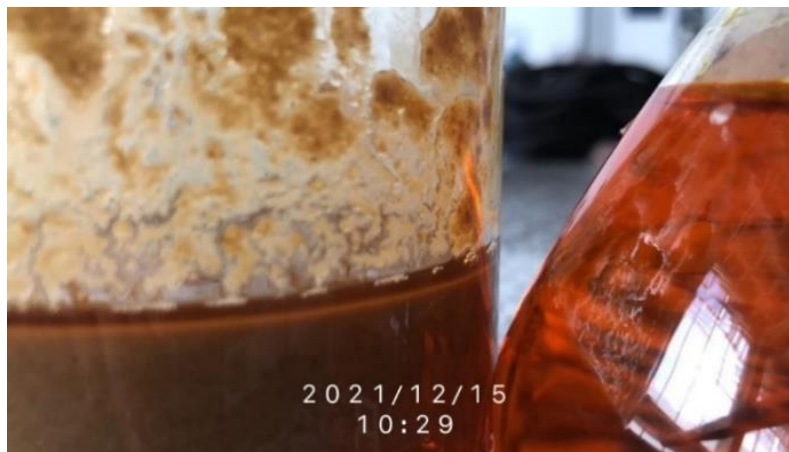
Datos y resultados del ensayo de impurezas orgánicas para la arena de Santo Tomás y el HPT

DATOS TÉCNICOS		
Norma	NTC 127 – Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino.	
Tipo de agregado	Arena de Santo Tomás	Hueso porcino triturado
Fecha	12/01/2021	15/12/2021
Muestra	1	1
DATOS OBTENIDOS		
Color determinado	1	4

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Figura 14

Ensayo de impurezas orgánicas del HPT



Nota: Fuente (Autores).

Densidad y absorción.**Tabla 20***Datos y resultados del ensayo de densidad y absorción para la arena de Santo Tomás*

DATOS TÉCNICOS		
Norma	NTC 237 – Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino.	
Tipo de agregado	Arena de Santo Tomás	Hueso porcino triturado
Fecha	16/12/2021	15/12/2021
Muestra	1	1
DATOS OBTENIDOS		
Masa de la muestra SSS, g.	230	230
Masa del picnómetro con agua, g.	655	655
Masa del picnómetro con la muestra SSS, g.	799	745
Masa de la muestra seca, g.	228	223
RESULTADOS		
Densidad nominal, g/cm ³ .	2,714	1,677
Densidad aparente, g/cm ³ .	2,651	1,593
Densidad SSS, g/cm ³ .	2,675	1,643
Porcentaje de absorción, %.	0,877	3,139

Nota: Fuente (Elaboración propia).**Agua**

El agua utilizada fue de tipo potable suministrada por la empresa que presta este servicio en Barraquilla, Triple A S.A. E.S.P.

Fase 6: Elaboración de cubos de mortero

Una vez se establecieron las dosificaciones para las mezclas de mortero, se procedió a iniciar el proceso de fabricación de los especímenes.

Equipos y herramientas

Los equipos y herramientas empleadas en la preparación de las muestras se muestran a continuación y fueron facilitadas por la empresa Ultracem S.A.S. en calidad de préstamo.

- Mezcladora mecánica.

Figura 15

Mezcladora



Nota: Fuente (Autores).

- Moldes para probetas cúbicas de 50 mm de 3 compartimientos.

Figura 16

Moldes



Nota: Fuente (Autores).

- Herramientas menores

Figura 17

Herramientas menores



Nota: Fuente (Autores).

- Balanza

Figura 18

Ilustración de la balanza usada



Nota: Fuente (DIRIMPEX, s. f.).

- Mesa de flujo

Figura 19

Mesa de flujo



Nota: Fuente (Autores).

- Medidor de aire

Figura 20

Medidor de aire ocluido en el mortero de 1lt de capacidad.



Nota: Fuente (Autores).

Procedimiento de elaboración del mortero

Para la elaboración del mortero se tuvieron en cuenta los siguientes pasos con base en la NTC 112 “*Mezcla mecánica de pasta de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*” (ICONTEC, 2013):

- Se pesaron las cantidades correspondientes de cada material incluyendo el porcentaje de reemplazo de HPT.

Figura 21

Pesaje de Arena de Santo Tomás



Nota: Fuente (Autores).

Figura 22

Pesaje del cemento



Nota: Fuente (Autores).

Figura 23

Pesaje del agua



Nota: Fuente (Autores).

- Se utilizó una mezcladora mecánica siguiendo el proceso descrito por la NTC 112 para realizar el mezclado de los materiales.

Figura 24

Mezclado de materiales

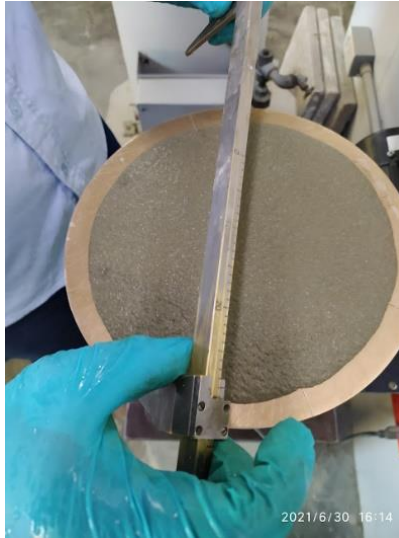


Nota: *Fuente (Autores).*

- Se realizó el ensayo en la mesa de flujo para verificar que la cantidad de agua cumpliera con la consistencia requerida para continuar con el ensayo (110 ± 5)

Figura 25

Ensayo de fluidez



Nota: Fuente (Autores).

- Adicional a ello se midió la cantidad de aire ocluido en el mortero determinando la relación de vacíos de la mezcla la NTC 224 “*Método para determinar el contenido de aire en morteros de cemento hidráulico*”(ICONTEC, 2017).

Figura 26

Apisonado del mortero



Nota: Fuente (Autores).

Figura 27

Toma de medida contenido de aire



Nota: Fuente (Autores).

- Se fundieron los cubos de mortero siguiendo lo descrito en la NTC 220
“Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm da lado” (ICONTEC, 2008).

Figura 28

Llenado de moldes



Nota: Fuente (Autores).

- Se llevaron los moldes a la cámara de curado por 24h para luego ser desmontados y sumergidos en agua con cal.

Figura 29

Cubos dentro de los moldes en la cámara de curado



Nota: Fuente (Autores).

Figura 30

Curado de cubos luego de desmoldarse



Nota: Fuente (Autores).

Análisis de resultados

Ensayos de los agregados

Previo al chequeo de resultados referente al comportamiento mecánico del mortero es pertinente analizar los resultados obtenidos en los ensayos de los agregados, tanto de la arena como del HPT al ser el reemplazo porcentual de esta.

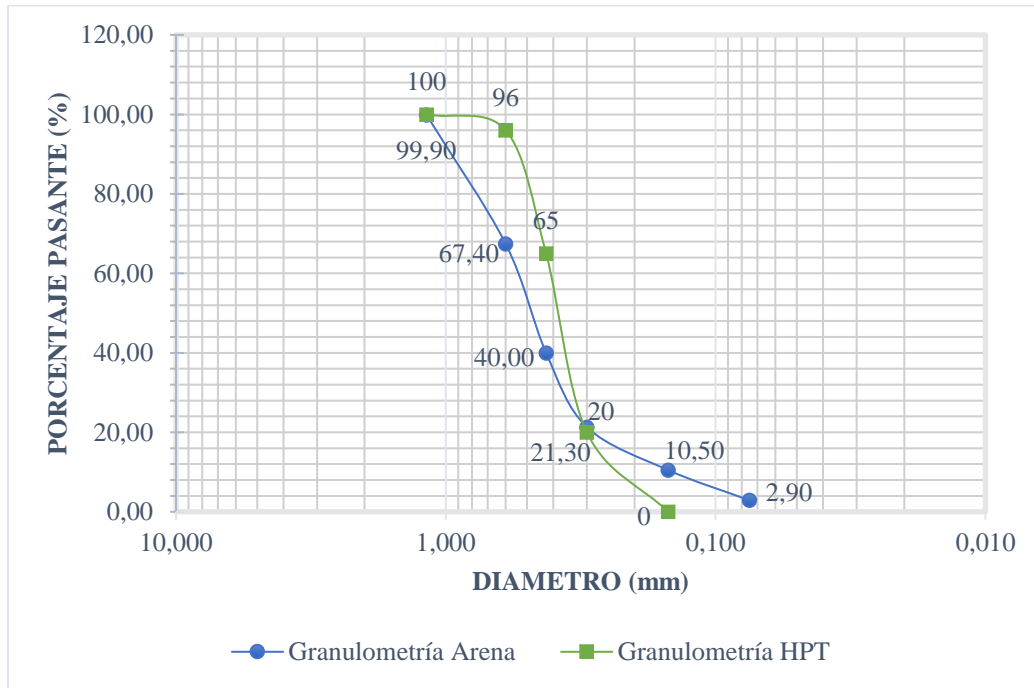
Granulometría del HPT

Al revisar el comportamiento granulométrico del HPT se evidencia que dentro del material resultante es posible obtener las gradaciones necesarias para el desarrollo de ensayos de mortero como los definidos en la NTC 220, lo cual puede asegurar una buena acomodación de las partículas del agregado en la mezcla. Teniendo en cuenta la granulometría conseguida, el módulo de finura resultante del HPT fue de 1.84, mientras el módulo de la Arena de Santo Tomás fue de 2.01, lo cual los clasifica a ambos como arenas finas (Simeon Cañas, s. f.).

La arena de Santo Tomás es un agregado que permite hacer la comparación de la resistencia a la compresión teniendo en cuenta que se manejó un cubo con 0% reemplazo de HPT.

Figura 31

Curvas de distribución granulométrica de los agregados



Nota: Fuente (Autores).

Humedad de los agregados

El ensayo de humedad para el hueso arrojó un resultado de 4,5%; mientras, el valor obtenido con la arena de Santo Tomás corresponde a un 2,67%, mostrando una diferencia de humedades entre agregados del 70%. Sin embargo, es necesario tener en cuenta el proceso previo que se le tuvo que realizar al hueso para poder obtener su estado triturado, en este sentido, el material fue dejado repetidas veces en el horno, por lo tanto, se trata la humedad natural del material como la humedad a la que el HPT estuvo expuesto en el ambiente.

Es posible considerar que esta variación puede afectar el volumen del agregado, además de que significa que el hueso aporta agua que al sumarse a la cantidad requerida para generar la mezcla puede alterar la relación agua cemento.

Masa unitaria de los agregados

Se evidencia que el HPT es más ligero que el agregado arena de Santo Tomás, por lo cual se puede decir que se da en menor proporción la relación masa/volumen. En cuanto a la masa unitaria suelta el HPT (604 kg/m^3) muestra una diferencia del 56% con respecto de la arena (1373.31 kg/m^3); mientras que los valores del ensayo al compactar difieren en un 47% con 817.93 kg/m^3 para el hueso y para el agregado convencional 1545.11 kg/m^3 .

Al tener un agregado que pesa menos se espera obtener una mezcla con esta misma característica en comparación con la muestra patrón.

Impurezas orgánicas de los agregados

El resultado del ensayo de contenido de impurezas orgánicas para el hueso presentó un color ligeramente más oscuro al color de la solución estándar, lo que quiere decir, de acuerdo con la NTC 127, que el material contiene compuestos orgánicos.

Por su parte, los resultados de la arena de Santo Tomás fueron aportados por la empresa Ultracem S.A.S., quienes encontraron que el color que se produjo era un blanco claro o transparente, es decir, de acuerdo con la NTC 127, este no contiene materia orgánica y es de buena calidad.

Densidad y absorción de los agregados

La densidad del HPT es menor a la densidad de la arena en todos los estados, disminuyendo 38,23% en la densidad nominal, 39,92% en la densidad aparente y 38,57% en la

densidad SSS en comparación con el agregado convencional. Además, el hueso, con un 3.139 %, obtuvo un mayor porcentaje de absorción que la arena de Santo Tomás (0.877%) con una diferencia de 257,85%.

Ensayos en el mortero

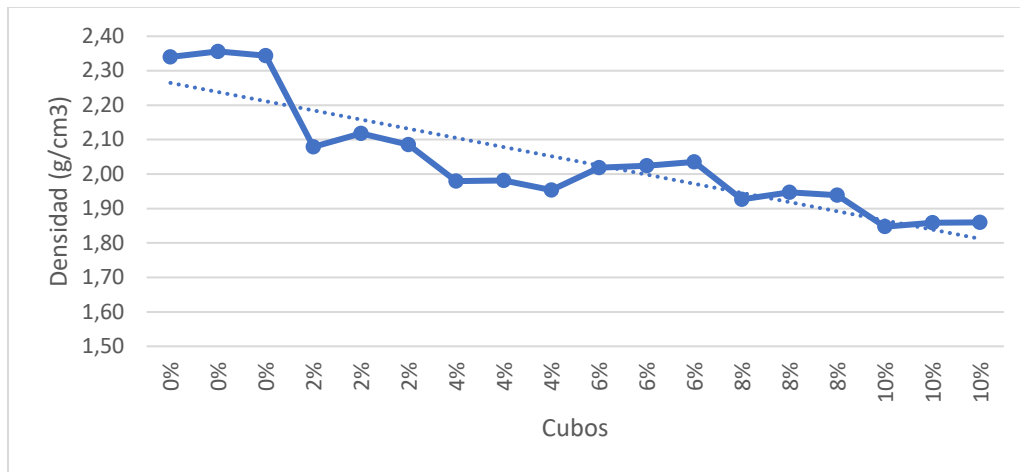
Una vez analizada la caracterización de los agregados finos (ver en *Ensayos de los agregados*) se procede a observar el comportamiento del mortero teniendo en cuenta la manera en la que afectan dichas propiedades a la mezcla tanto en estado fresco como endurecido.

Comportamiento físico del mortero

Se tomaron 3 cubos para representar cada porcentaje de reemplazo y como se muestra en el *Figura 32* el peso de los cubos tiende a disminuir con el aumento del porcentaje de reemplazo, lo cual se le atribuye a la densidad de los agregados. Los cubos del 2% presentaron una diferencia en promedio del 11% respecto a la muestra patrón y los cubos del 10% disminuyeron su peso un promedio de 21% respecto a la muestra patrón.

Figura 32

Variación del peso en los cubos de mortero de acuerdo con porcentaje de reemplazo de HPT



Nota: Fuente (Autores).

Comportamiento mecánico del mortero

Los 162 cubos de mortero fueron fallados una vez alcanzaron las edades de ensayo (7, 14 o 28 días) y los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos, teniendo en cuenta el porcentaje agregado fino reemplazado por HPT, se presentan en la *Tabla 21*.

Tabla 21

Resultados de resistencia a la compresión para todos porcentajes de reemplazo

Resistencia a la compresión en cubos de mortero con reemplazos de HPT (PSI)							
%Reemplazo	7 días	14 días	28 días	%Reemplazo	7 días	14 días	28 días
0%	3952	4605	4758	6%	1165	1499	1605
	4056	4930	4917		1117	1568	1631
	3879	4588	4495		1233	1688	1509
	3948	4595	4583		848	1732	1533
	4361	4946	4699		1098	1641	1676
	3962	4955	4689		871	1566	1552
	4320	4979	4892		966	1753	1460
	4186	4908	4751		1159	1714	1525

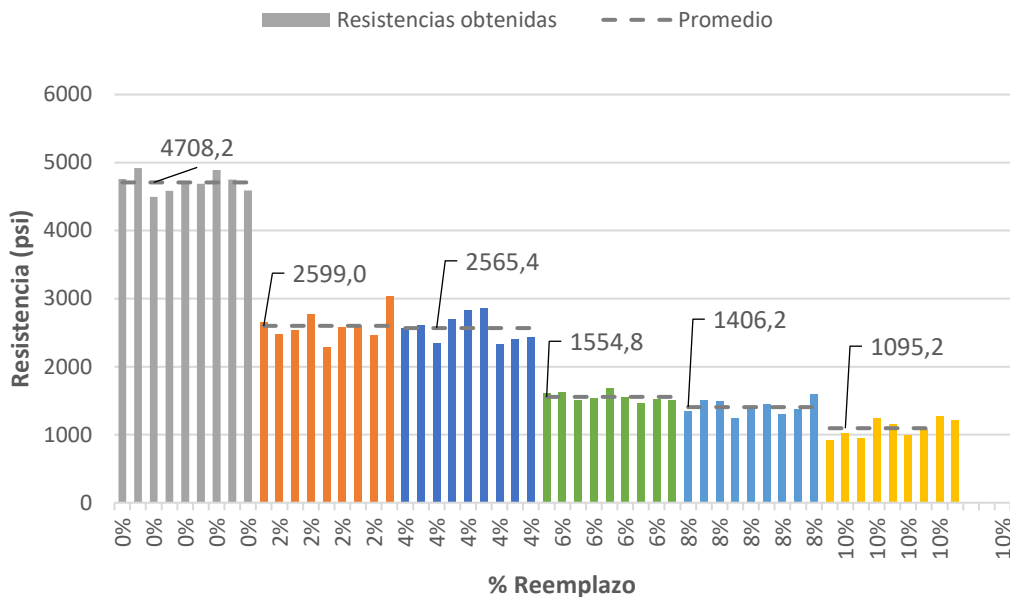
	4283	4953	4590		1120	1787	1502
	2145	1998	2654		845	1466	1338
	2579	1993	2482		864	1525	1506
	2139	1880	2530		856	1518	1490
	2234	2130	2771		988	1425	1243
2%	2291	2456	2285	8%	1047	1397	1377
	2197	2120	2573		954	1432	1444
	2220	2028	2601		745	1501	1299
	2307	2311	2460		709	1402	1368
	2251	2011	3035		766	1548	1591
	1274	1423	2562		658	935	917
	1282	1616	2613		626	946	1016
	1158	1542	2340		656	964	955
	1214	1711	2704		686	1039	1247
4%	1370	1476	2831	10%	778	745	1151
	1401	1706	2864		737	893	999
	1417	1472	2330		754	915	1080
	1415	1824	2410		808	1068	1277
	1558	1720	2435		818	948	1215

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Con base a los datos obtenidos a los 28 días se construyó la siguiente gráfica

Figura 33

Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días



Nota: Fuente (Autores).

De acuerdo con los resultados anteriores se determinó el promedio y el coeficiente de variación para observar la dispersión entre los resultados dependiendo de la edad de ensayo y el porcentaje de HPT obteniendo la *Tabla 22*.

Tabla 22

Promedio de los resultados de resistencia a la compresión para todos porcentajes de reemplazo

%Reemplazo	Promedio (PSI)			CV		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
0%	4105,22	4828,78	4708,22	4,49%	3,75%	3,02%
2%	2262,56	2103,00	2599,00	5,83%	8,50%	8,16%
4%	1343,22	1610,00	2565,44	9,13%	8,62%	7,90%

6%	1064,11	1660,89	1554,78	12,80%	5,92%	4,45%
8%	863,78	1468,22	1406,22	13,27%	3,87%	7,86%
10%	724,56	939,22	1095,22	9,75%	9,80%	12,11%

Como se puede observar, el coeficiente de variación para la mayoría de los datos va entre 0 y 10%, y unos pocos entre 10 y 15%, lo que quiere decir que, el promedio del grupo de datos va de altamente representativo a bastante representativo, es decir, existe muy poca o poca dispersión entre los datos, por lo cual, los valores promedio de las resistencias para cada porcentaje de reemplazo con HPT y edad de ensayo logra ser un valor de análisis que abarca toda la muestra datos.

Teniendo en cuenta lo establecido en el numeral 0 *Tipos de mortero de mampostería*, donde se mencionan los tipos de mortero de pega de acuerdo a la resistencia mínima a la compresión a los 28 días según Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010, y el resultado de resistencia promedio arrojado por los cubos de mortero, se tiene que los cubos con reemplazo del 0% los cuales tuvieron una resistencia promedio de 4708.22 PSI se clasificarían como Tipo H, los cubos de 2 y 4% se clasificarían como tipo M debido a que su resistencia promedio fue de 2599.00 y 2565.44 PSI respectivamente, y los cubos de 6, 8 y 10% corresponden a un mortero tipo N puesto que su resistencia promedio fue de 1554.78, 1406.22 y 1095,22 PSI.

De acuerdo con el comportamiento de los cubos de mortero mostrado en la *Tabla 23*, se puede observar que, la resistencia a la compresión disminuye para todas las edades de ensayo cuando se aumenta el porcentaje de reemplazo de HPT, cabe resaltar que los cubos del 2%

redujeron su resistencia a la compresión un 44.80% con respecto a la muestra con reemplazo del 0% a los 28 días y los cubos del 10% mostraron una reducción del 76.74% para la misma edad.

Tabla 23

Diferencia entre promedios de resultados de resistencia a la compresión respecto a la muestra con 0% de reemplazo

%Reemplazo	Diferencia promedio respecto a la muestra patrón		
	7 días	14 días	28 días
0% - 2%	44,89%	56,45%	44,80%
0% - 4%	67,28%	66,66%	45,51%
0% - 6%	74,08%	65,60%	66,98%
0% - 8%	78,96%	69,59%	70,13%
0% - 10%	82,35%	80,55%	76,74%

Nota: Fuente (Elaboración propia).

Porcentaje de aire ocluido y relación agua cemento

En cuanto a los ensayos que se hicieron a la mezcla, a cada porcentaje de reemplazo además de medir el porcentaje de aire ocluido, se hizo un chequeo por medio de la mesa de flujo, y para cumplir con este último parámetro se fue variando la cantidad de agua, como se muestra en la *Tabla 24*:

Tabla 24

Relación agua-cemento y porcentajes de flujo y aire para cada reemplazo

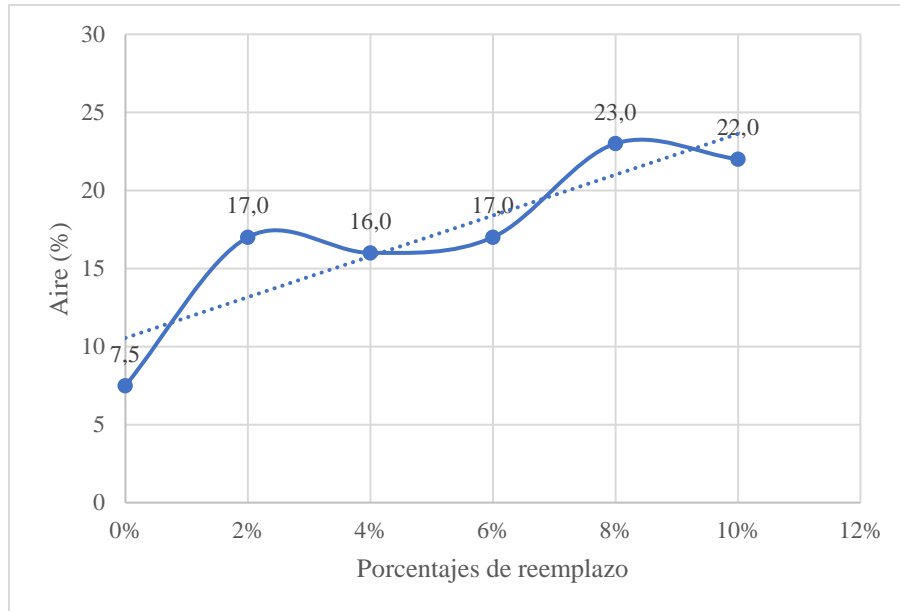
Porcentajes	Flujo (%)	Aire (%)	Relación a/c
0%	113	7,5	0,52
2%	114	17	0,51
4%	110	16	0,53
6%	107	17	0,55
8%	113	23	0,54
10%	114	22	0,55

Nota: Elaboración propia.

Con base en la información anterior se trazó el siguiente gráfico:

Figura 34

Contenido de aire en la mezcla de mortero por porcentaje de reemplazo



Nota: Fuente (Autores).

Teniendo en cuenta que, los resultados del ensayo de contenido orgánico mostraron que el HPT, a pesar de pasar por un proceso de limpieza, aun contenía materia orgánica, dado que presentaba una consistencia grasosa la cual se evidenciaba al manipularlo. En relación a esto, los aditivos aireantes “suelen ser resinas de madera, sales de lignosulfonatos, grasas y aceites animales y vegetales”(PSI, 2020), por esto se puede decir que, la grasa del hueso se mostró como un agente que incorporó aire a la mezcla de mortero. En este sentido, el mortero con reemplazos de HPT en estado endurecido toma una apariencia porosa, lo cual sugiere un cubo de mortero más ligero que el mortero patrón, sin embargo, predice a su vez un comportamiento mecánico negativo, debido a que el contenido de aire es una propiedad índice de las demás características del mortero que afecta la manejabilidad y durabilidad (Asociación Colombiana de Productores de Concreto, 1997).

Dicho lo anterior, se puede observar en el *Figura 34* que aumentar el porcentaje de HPT reemplazado entre el 2% y el 6% la variación entre cada muestra es del 1%. Sin embargo, se encuentra que en el reemplazo de 8% de HPT de se da el valor de contenido de aire más alto (23%). En las *Figuras 35* y *36* se ve un espécimen convencional y unos que contine HPT, respectivamente.

Figura 35

Fotografía tomada a los especímenes convencional



Nota: Fuente (Autores).

Figura 36

Fotografía a especímenes con reemplazo de HPT



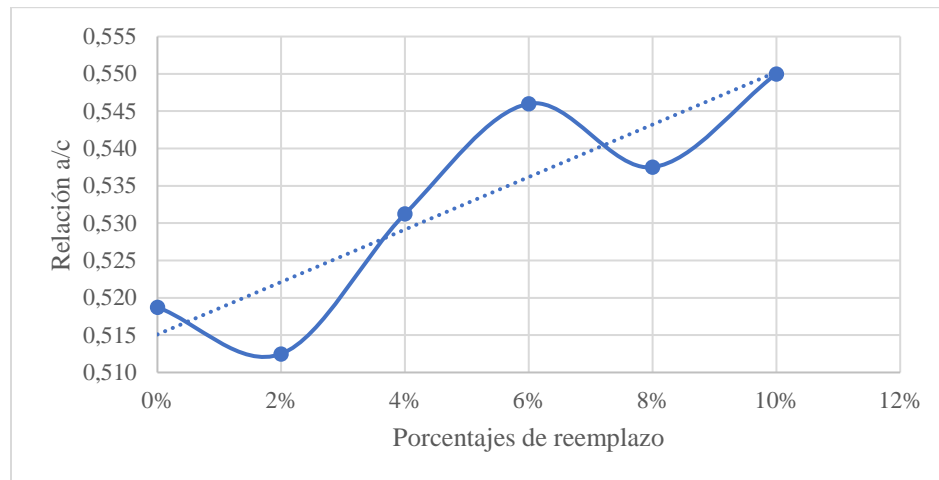
Nota: Fuente (Autores).

Referente al *Figura 37*, se puede notar un aumento no lineal de la relación agua/cemento. El procedimiento exige que antes de hacer los cubos de mortero se pase la mezcla por la mesa de flujo para chequear que la fluidez esté dentro de los parámetros, por ello a medida que se iba reemplazando más arena por HPT se iba haciendo el ensayo de la mezcla de flujo y si esta no cumplía se hacía una mezcla con más agua. Durante el proceso de mezclado se observó que la consistencia de la mezcla con 0% de reemplazo era distinta al hacer el reemplazo con HPT. El mortero con hueso presentaba mayor manejabilidad y un olor característico, además de que este requería mayor cantidad de agua, que se atribuye a la rápida absorción de esta por parte del hueso reflejada en el ensayo visto en el numeral 0. *Nota:* Fuente (Autores).

Densidad y absorción.

Figura 37

Relación agua/cemento por porcentaje de reemplazo



Nota: Fuente (Autores).

Conclusiones

El presente estudio se analizó el uso de hueso porcino triturado (HPT) como reemplazo parcial del agregado en una mezcla de mortero, evaluando su resistencia a la compresión en 162 cubos. Además, se ensayaron los agregados (tanto HPT como arena) con el objetivo de entender su relación con las resistencias obtenidas trazando las siguientes conclusiones:

- Al utilizar HPT como reemplazo del 0% al 10% del agregado fino, se observó que el valor de la resistencia a la compresión disminuye al aumentar su proporción de reemplazo. En este sentido la porción óptima que dio mayor valor de resistencia fue con el 2% mientras, el menor valor de resistencia obtenido para todas las edades fue el del reemplazo del 10%.
- El procedimiento de limpieza no logró eliminar toda la grasa proveniente del hueso y esta actuó dentro de la mezcla como aditivo de aire lo cual se evidencia por medio de los resultados de ensayo de aire ocluido, para el cual el mayor valor de contenido de aire (23%) fue obtenido por las muestras con 8% de reemplazo. Adicionalmente, las muestras con HPT presentan poros, lo que sugiere ser una posible causa de disminución del peso en los cubos de mortero.
- En cuanto a la propiedad física del peso para los cubos de mortero se logró ver que, al aumentar el porcentaje de reemplazo, éste disminuía, lo cual sugiere que la densidad del HPT en conjunto con los poros que se forman en la mezcla endurecida (Debido a la inclusión de aire) pudieron afectar el peso total del cubo.
- Debido a que el hueso presenta mayor absorción que la Arena de Santo Tomás, la cual sobrepasa la arena en un 257.85%, la mezcla requiere de mayores

cantidades de agua para llegar a la fluidez requerida por la norma, y por lo tanto su relación agua/cemento aumenta afectando negativamente la resistencia a la compresión.

- Únicamente, teniendo en cuenta solo la resistencia a la compresión mostrada por los cubos a los 28 días, se logran clasificar dentro de los tipos de mortero que se establecen en la NSR-10, así: los cubos del 0% como un mortero tipo H, los cubos del 2% y 4% como tipo M y los cubos de 6%, 8% y 10% como morteros de tipo N. Sin embargo, es necesario tener en cuenta para su aplicación el contenido de aire.

Recomendaciones

- Realizar un mayor proceso de trituración previa del material HPT con el fin de optimizar los procesos de reducción de tamaño en laboratorio.
- Para futura obtención de material se recomienda variar el proceso de limpieza de tal manera que se logre retirar la mayor cantidad de material orgánico.
- Evaluar nuevas alternativas de molienda de tal manera que se consiga un proceso de preparación del hueso más rápido, dado que se observó que el proceso de molienda que se llevó a cabo en el presente proyecto es laborioso y repetitivo, además, al moler el hueso entero no se obtiene el mismo volumen, por lo que es necesario procesar gran cantidad de hueso para obtener una masa de grano considerable.
- Para la obtención del material es importante respetar los tiempos de secado en el horno, dado que esto permite reducir la grasa que acompaña al material, facilitando el proceso de tamizado.
- Evaluar distintas temperaturas y tiempos de secado en horno con el fin de identificar posibles variaciones en el HPT obtenido.
- Evaluar el comportamiento de resistencia de mortero aplicando hueso porcino triturado y acompañándolo de aditivos que disminuyan la cantidad de agua requerida para la mezcla, teniendo en cuenta la alta absorción que maneja el material.
- Analizar la viabilidad del hueso como aditivo inclusor de aire, debido a los resultados que presentaron las muestras con reemplazo en los ensayos de aire ocluido se podría evaluar.

- Hacer ensayos a la mezcla añadiendo aditivos que permitan la retención de agua pero que aseguren su resistencia, teniendo en cuenta que una posible causa por la cual la resistencia se vio una disminución dada la cantidad de agua requerida para alcanzar la fluidez.
- Estudiar las propiedades para su aplicación como mortero ligero, Teniendo en cuenta que el mortero con HPT es más ligero que el mortero sin reemplazo y de acuerdo con las resistencias obtenidas se pudo clasificar dentro de los tipos de mortero establecidos en la NSR – 10.

Referencias

Agronet. (2021, mayo 12). Del concreto reciclado se obtendría un mortero más durable.

Recuperado 6 de febrero de 2022, de <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Del-concreto-reciclado-se-obtendría-un-mortero-más-durable.aspx>

Alfa Laval - Procesado de huesos. (s. f.). Recuperado 6 de enero de 2022, de

<https://www.alfalaval.com.co/industrias/alimentos-lacteos-y-bebidas/procesado-de-alimentos/procesado-de-carne-y-aves/procesado-de-huesos/>

Anwar, F. H., Malami, S. I., Baba, Z. B., Farouq, M. M., Labbo, M. S., Aliyu, D. S., & Umar, A. B.

(2019). *Compressive Strength of Lightweight Concrete and Benefit of Partially Replacing Cement By Animal Bone Ash (Aba)*. 6(6), 554-560. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/336458894_Issue_6_wwwjetirorg_ISSN-2349-5162

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*. Recuperado de

<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00004849.pdf>

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Título D - Mampostería Estructural. En *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia.

Asociación Colombiana de Productores de Concreto, A. (1997). *Concreto y mortero : tecnología, propiedades, ensayos de calidad* (2da ed.). Recuperado de

http://catalogobibliografico.cuc.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9134&query_desc=kw%2Cwrdl%3A+concreto+y+mortero

- Banco Mundial. (2018). Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos. Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Brut. (2019). El concreto daña al medio ambiente mucho más de lo que te imaginas. Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.brut.media/mx/economy/el-concreto-da-a-al-medio-ambiente-mucho-mas-de-lo-que-te-imaginas-a4944c77-9ac5-462e-94cc-5e4a9d3294f3>
- Cementos La Union, S. A. (2015). La historia del cemento. Recuperado 2 de enero de 2022, de <http://www.launion.es/la-historia-del-cemento/>
- CONtexto Ganadero. (2014, abril 4). En Florencia los huesos se volvieron un problema duro de roer | CONtexto ganadero | Noticias principales sobre ganadería y agricultura en Colombia. Recuperado 9 de junio de 2021, de <https://www.contextoganadero.com/regiones/en-florencia-los-huesos-se-volvieron-un-problema-duro-de-roer>
- Crespo Escobar, S. (2010). *Materiales de la construcción para edificación y obra civil*.
- De Elorza M, G. (2004). Ciencias Naturales I. En G. De Elorza M., F. Rodriguez P., & A. Huidobro D. (Eds.), *Enciclopedia Autodidactica Nuevo Milenio* (1.^a ed.). Bogotá: Zamora Editores Ltda.
- DIRIMPEX. (s. f.). Balanza electrónica SCOUT® SPX 6200 g x 0.1 g. Recuperado 15 de enero de 2022, de <https://dirimpex.com/equipos/balanza-electronica-scout-spx-6200-g-x-0-1-g/>
- Falade, F., Ikponmwoza, E., & Fapohunda, C. (2014). Flexural performance of foam concrete containing pulverised bone as partial replacement of cement. *Maejo Int. J. Sci. Techno!*, 8(01), 20-31. Recuperado de <https://ir.unilag.edu.ng/handle/123456789/2633>

- Galvez Escalante, L. J. (2018). Influencia de los huesos calcinados por arena, módulo de finura y relación cemento: arena sobre la resistencia a la compresión, densidad y capilaridad durante la elaboración de morteros modificados (Universidad Nacional de Trujillo). Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10636>
- Gomez Jurado Sarria, J., & Sánchez De Guzmán, D. (1997). *Tecnología y propiedades* (2.^a ed.). Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO).
- Gutiérrez De López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (2.^a ed.). Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández Jaén, U., Hernández Martínez, H. E., & Maldonado Bandala, E. (2011). *Comportamiento mecánico y físico del mortero a base de CBCA como árido en aplanados en muros* (Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería. Región Xalapa.). Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/30602>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2007). *NTC 3937: Cementos. Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico.*
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2008). NTC 220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8mm de lado. *Journal of Chemical Information and Modeling*, Vol. 53, p. 287.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2013). Ntc 112: Ingeniería civil y arquitectura. Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, Vol. 53, pp. 1689-1699.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2014). *NTC 121: Especificación de desempeño para cemento hidráulico.*

- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2017, marzo 22). *NTC 224: Cementos. Método para determinar el contenido de aire en morteros de cemento hidráulico*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-cementos-metodo-para-determinar-el-contenido-de-aire-en-morteros-de-cemento-hidraulico-ntc224-2017.html>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2018). *NTC 77: Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos* (p. 12). p. 12.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas. (2021). *NTC 111: Cementos. especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidráulico*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-cementos-especificaciones-para-la-mesa-de-flujo-usada-en-ensayos-de-cemento-hidraulico-ntc111-2021.html>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (2013). De la historia del cemento. *Construcción y Tecnología en Concreto*. Recuperado de www.yucatan-holidays.com/es/los-5-mejores-sitios-
- Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos. (2019). PLANTAS DE BENEFICIO, DESPOSTE , DESPRESE Y ACONDICIONADORES QUE CUMPLEN CON LOS REQUISITOS SANITARIOS EXIGIDOS EN EL DECRETO 1500 DE 2007, DECRETO 2270 DE 2012 Y RESOLUCIONES REGLAMENTARIAS. Recuperado 9 de junio de 2021, de <https://www.invima.gov.co/documents/20143/426809/PLANTAS-DE-BENEFICIO-DESPOSTE-Y-DESPRESE-AUTORIZADAS-POR-EL-INVIMA-PARA-SU-FUNCIONAMIENTO-A-JULIO-DE-2019-as-asp.pdf>
- Iturbe, Z. (2019). ¿Qué materiales sostenibles existen para reemplazar al hormigón? Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.houzz.es/revista/que-materiales-sostenibles-existen-para->

reemplazar-al-hormigon-stsetivw-vs~119821102

Izquierdo, I. S., Izquierdo, O. S., & Ramalho, M. A. (2018). Physical and mechanical properties of concrete using residual powder from organic waste as partial cement replacement. *Revista Ingenieria de Construccion*, 33(3), 229-240. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229>

Kheme Chemical. (s. f.). *Aditivos para concreto y mortero*. Recuperado de https://www.khemechemical.com/pdf/Kheme_HM.pdf

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto* (1.ª ed.). Illinois: Portland Cement Association (PCA).

Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para Ingeniería Civil*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.

Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 2(2), 35-47. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112011000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Monterrosa Blanco, H. (2018). Hasta 70% de los residuos sólidos del país se pueden transformar en compostaje. *La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/hasta-70-de-los-residuos-solidos-del-pais-se-pueden-transformar-en-compostaje-2762298>

Monterrosa Blanco, H. (2019). Colombia podría aprovechar 40% de las toneladas de residuos que genera anualmente. *La República- Edición Colombia*. Recuperado de

<https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/colombia-podria-aprovechar-cerca-de-40-de-los-116-millones-de-toneladas-de-residuos-que-genera-al-ano-2813141>

Mora Samacá, J. I. (2019). Bone tissue, a new alternative in aggregates for concrete. *Ingeniería Solidaria*, 15(27), 1-38. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2019.01.07>

Mouthón, L. (2020, diciembre 23). Producción de carne de cerdo en Atlántico fue de 10.967 toneladas. *El Heraldo*. Recuperado de <https://www.elheraldo.co/economia/produccion-de-carne-de-cerdo-en-atlantico-fue-de-10967-toneladas-782438>

Moya Heredia, J. C., Changoluisa Aimacaña, D. A., & Oña Guaranda, G. V. (2018). *Diseño de hormigón biocompuesto a partir de residuos de osamentas de animales* (Quito: UCE). Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14413>

Moya Heredia, J. C., Guamán Moromenacho, E. A., & Torres Cueva, V. Y. (2019). *Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón biocompuesto elaborado con osamenta de animales- Segunda Etapa* (Quito: UCE). Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18874>

Naciones Unidas. (2015). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Natarajan, K. S., Ramalingasekar, D., Palanisamy, S., & Ashokan, M. (2022). Effect on mechanical properties of lightweight sustainable concrete with the use of waste coconut shell as replacement for coarse aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18905-9>

Ochoa L., R., & Flores B., E. (1994). Química del cemento: parte I. *Revista de Química*, VIII(2). Recuperado de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5537/5533>

- Osorio, J. (2003). *Manual de control de calidad del concreto en la obra*. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO).
- OVACEN. (2018). 11 materiales de construcción que sorprenden. Recuperado 6 de febrero de 2022, de <https://ovacen.com/materiales-de-construccion/>
- 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*. Recuperado de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5008>
- Pérez Rojas, Y. A., & Vera López, E. (2021). Resistencia a compresión de concreto con escoria de horno de arco eléctrico y vidrio molido reciclado en remplazo del agregado grueso y fino. *Revista ingeniería de construcción*, 36(3), 342-360. <https://doi.org/10.7764/RIC.00007.21>
- Petrounias, P., Rogkala, A., Giannakopoulou, P. P., Lampropoulou, P., Xanthopoulou, V., Koutsovitits, P., ... Golfopoulos, A. (2021). An innovative experimental petrographic study of concrete produced by animal bones and human hair fibers. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13148107>
- Pinzón Sánchez, A. M. (2019). Los materiales más usados para la construcción en Colombia. Recuperado 13 de enero de 2022, de Contratistas website: <https://contratistas.co/noticias/los-materiales-mas-usados-en-construccion-colombia/>
- Porkcolombia. (2021). *Estadísticas Sectoriales de Producción*. Recuperado de <https://www.porkcolombia.co/download/26174/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado 28 de mayo de 2021, de

<https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

PSI. (2020). Aditivos para concreto: tipos y sus usos | PSI Concreto. Recuperado 29 de diciembre de 2021, de <https://psiconcreto.com/aditivos-para-concreto/>

Ramya, M., Mercy Shanthi, R., & Suji, D. (2019). Strength Evaluation Of Sustainable Concrete With Partial Replacement Of Cement By Combination Of Banana Leaf Powder And Cattle Bone Powder. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1179.0486S419>

Recytrans. (2013). Reciclaje de residuos orgánicos . Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.recytrans.com/blog/reciclaje-de-residuos-organicos/>

Repsol. (2021). Economía circular. Recuperado 6 de febrero de 2022, de <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/economia-circular/index.cshtml>

Revista En Obra. (2013). Concretos y morteros. Recuperado 6 de febrero de 2022, de <https://enobra.com/ediciones/ed-25-dede-gca-suman-fortalezas/concretos-y-morteros/>

Rincón Carrascal, M. A., & Santiago Manzano, C. (2018). *Evaluación de la resistencia del concreto a compresión, flexión y corte indirecto al adicionarle fibras de cabello humano*. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Salamanca, R. (2001). *La tecnología de los morteros*. Bogotá: Ciencia e ingeniería Neogranadina.

Sánchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Simeon Cañas, J. (s. f.). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 (75 m) en agregado mineral por lavado*. Recuperado de <https://www.uca.edu.sv/mecanica->

estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRI
A.pdf

Susunaga Monroy, J. M. (2014). *Construcción sostenible, una alternativa para la edificación de viviendas de interés social y prioritario* (Universidad Católica de Colombia). Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/1727/1/CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE, UNA ALTERNATIVA PARA LA EDIFICACIÓN DE VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL Y PRIORITARIO.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/1727/1/CONSTRUCCIÓN_SOSTENIBLE,_UNA_ALTERNATIVA_PARA_LA_EDIFICACIÓN_DE_VIVIENDAS_DE_INTERES_SOCIAL_Y_PRIORITARIO.pdf)

Tipos de Morteros para la construcción - Cementos Tequendama. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2022, de <https://cetesa.com.co/blog/tipos-de-morteros-para-la-construccion/>

Tortora, G. J., & Derrickson, B. H. (2013). Sistema esquelético: tejido óseo. En *Principios de Anatomía y Fisiología* (13.^a ed., pp. 173-196). Recuperado de <https://faciasweb.uncoma.edu.ar/sites/default/files/Cap 6 Tortora - Sistema Esquelético Tejido Oseo.pdf>

Vanguardia. (2020). Porcicultores de Colombia se toman las subastas virtuales | Vanguardia.com. Recuperado 28 de mayo de 2021, de <https://www.vanguardia.com/economia/nacional/porcicultores-de-colombia-se-toman-las-subastas-virtuales-YN2780331>

Verma, A. (2008). Study of Concrete Properties using Bone Powder by Partial Replacement of Cement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4498. Recuperado de <https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5514.pdf>

Web of Science. (2022). *Analyze Results*. Recuperado de <https://www-webofscience-com.ezproxy.cuc.edu.co/wos/woscc/analyze-results/a8599687-354a-4fc5-865e->

eb1fef882f3a-1eac3aea

Anexos**Anexo 1. Registro fotográfico complementario****Limpieza del hueso**

Fotografía 1. Huesos hervidos y posterior limpieza con cuchillos. Fuente: Autores.



Fotografía 2. Inmersión de huesos en solución de agua y cloro, segunda limpieza con cuchillos y secado al ambiente. Fuente: Autores.

Trituración del hueso



Fotografía 3. Trituración manual inicial de los huesos.
Fuente: Autores.



Fotografía 4. Hueso triturado seco. Fuente: Autores.



Fotografía 5. Trituración final del hueso en máquina de los ángeles. Fuente: Autores.



Fotografía 6. Hueso triturado en máquina de los ángeles.
Fuente: Autores.

Ensayos de caracterización de los agregados

Ensayo de granulometría Arena de Santo Tomás



Fotografía 7. Peso tara. Fuente: Autores.



Fotografía 8. Peso material seco de la arena. Fuente: Autores.



Fotografía 9. Lavado a través del tamiz # 200. Fuente: Autores.



Fotografía 10. Peso del material seco con tara después de lavado. Fuente: Autores.



Fotografía 11. Material retenido en el tamiz # 30.
Fuente: Autores.



Fotografía 12. Peso del material retenido en el tamiz # 30. Fuente: Autores.



Fotografía 13. Material retenido en el tamiz # 40.
Fuente: Autores.



Fotografía 14. Peso del material retenido en el tamiz # 40. Fuente: Autores.



Fotografía 15. Material retenido en el tamiz # 50.
Fuente: Autores.



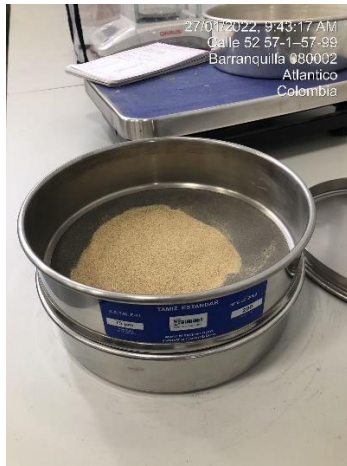
Fotografía 16. Peso del material retenido en el tamiz # 50. Fuente: Autores.



Fotografía 17. Material retenido en el tamiz # 100.
Fuente: Autores.



Fotografía 18. Peso del material retenido en el tamiz # 100. Fuente: Autores.



Fotografía 19. Material retenido en el tamiz # 200.
Fuente: Autores.



Fotografía 20. Peso del material retenido en el tamiz # 200. Fuente: Autores.



Fotografía 21. Material retenido en el fondo. Fuente: Autores.



Fotografía 22. Peso del material retenido en el fondo. Fuente: Autores.

Ensayo de densidad

Fotografía 23. Peso de la muestra SSS (Arena). Fuente: Autores. Fotografía 24. Peso del picnómetro con agua. Fuente: Autores.



Fotografía 25. Peso del picnómetro con muestra y agua hasta marca de calibración (Arena). Fuente: Autores.



Fotografía 26. Peso de la muestra seca con tara (Arena). Fuente: Autores.



Fotografía 27. Material en sumergido en agua por 24 hrs. (HPT). Fuente: Autores.



Fotografía 28. Material secado en estufa (HPT). Fuente: Autores.



Fotografía 29. Peso del picnómetro con muestra y agua hasta marca de calibración (HPT). Fuente: Autores.

Fotografía 30. Peso de la muestra seca con tara (HPT). Fuente: Autores.

Fotografía 30. Peso de la muestra seca con tara (HPT). Fuente: Autores.

Ensayo masa unitaria



Fotografía 31. Peso del molde con material suelto (HPT). Fuente: Autores.



Fotografía 32. Peso del molde con material compacto (HPT). Fuente: Autores.



Fotografía 33. Peso del molde con material suelto (Arena). Fuente: Autores.



Fotografía 34. Peso del molde con material compacto (Arena). Fuente: Autores.



Fotografía 35. Peso del molde. Fuente: Autores.

Ensayo de impurezas orgánicas en el HPT.

Fotografía 36. Medida del HPT. Fuente: Autores.



Fotografía 37. Medida del Hidróxido de Sodio. Fuente: Autores.



Fotografía 38. Mezcla de materiales y colocación en reposo. Fuente: Autores.



Fotografía 39. comparación con el color estándar. Fuente: Autores.

Ensayos de resistencia a la compresión

Fotografía 1. Prueba de cubos con reemplazo del 4% en las instalaciones de Ultracem S.A.S. Fuente: Autores.

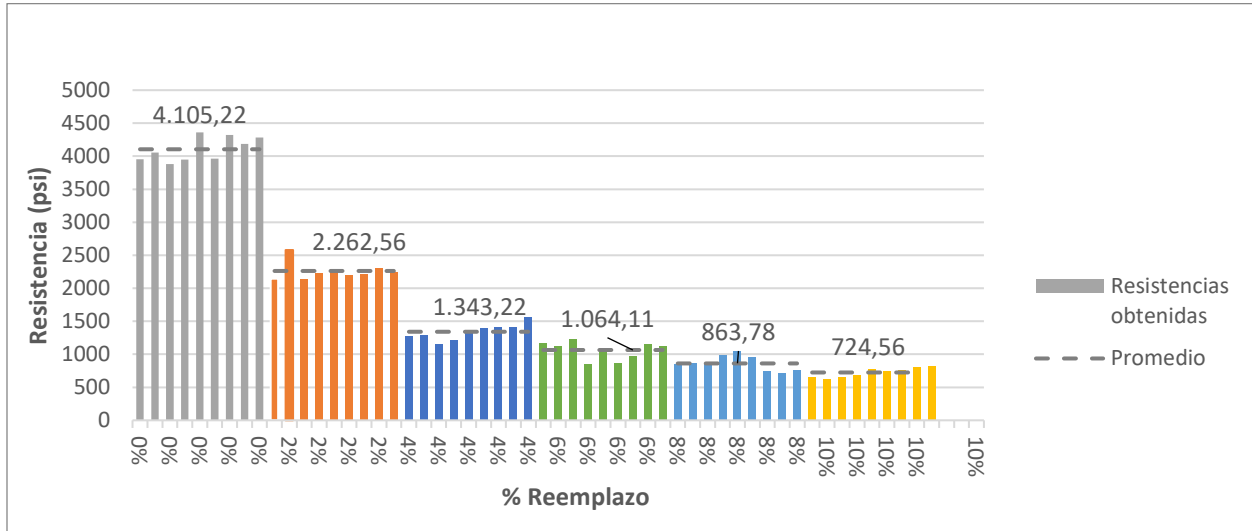
Anexo 2. Gráficos y tablas complementarias**Tabla 25**

Resultados de resistencia a la compresión para todos porcentajes de reemplazo en Megapascales

Resistencia a la compresión (MPa)							
Porcentajes	7 días	14 días	28 días	Porcentajes	7 días	14 días	28 días
0%	27,26	31,76	32,81	6%	8,03	10,34	11,07
	27,97	34,00	33,91		7,70	10,81	11,25
	26,75	31,64	31,00		8,50	11,64	10,41
	27,23	31,69	31,61		5,85	11,94	10,57
	30,08	34,11	32,41		7,57	11,32	11,56
	27,32	34,17	32,34		6,01	10,80	10,70
	29,79	34,34	33,74		6,66	12,09	10,07
	28,87	33,85	32,77		7,99	11,82	10,52
	29,54	34,16	31,66		7,72	12,32	10,36
2%	14,79	13,78	18,30	8%	5,83	6,45	9,23
	17,79	13,74	17,12		5,96	6,52	10,39
	14,75	12,97	17,45		5,90	6,65	10,28
	15,41	14,69	19,11		6,81	7,17	8,57
	15,80	16,94	15,76		7,22	5,14	9,50
	15,15	14,62	17,74		6,58	6,16	9,96
	15,31	13,99	17,94		5,14	6,31	8,96
	15,91	15,94	16,97		4,89	7,37	9,43
	15,52	13,87	20,93		5,28	6,54	10,97
4%	8,79	9,81	17,67	10%	4,54	6,45	6,32
	8,84	11,14	18,02		4,32	6,52	7,01
	7,99	10,63	16,14		4,52	6,65	6,59
	8,37	11,80	18,65		4,73	7,17	8,60
	9,45	10,18	19,52		5,37	5,14	7,94
	9,66	11,77	19,75		5,08	6,16	6,89
	9,77	10,15	16,07		5,20	6,31	7,45
	9,76	12,58	16,62		5,57	7,37	8,81
	10,74	11,86	16,79		5,64	6,54	8,38

Figura 38

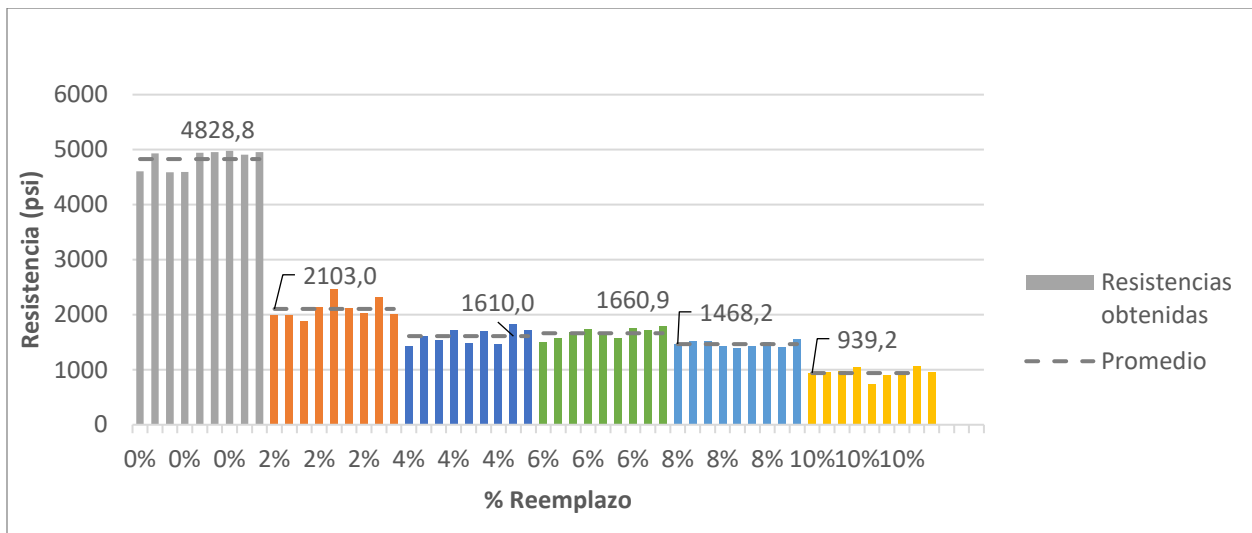
Resistencia a la compresión obtenida a los 7 días



Nota: Fuente (Autores).

Figura 39

Resistencia a la compresión obtenida a los 14 días



Nota: Fuente (Autores).

