

**Evaluación del uso de cáscara de huevo y carbón de arroz como posible sustituto parcial
del agregado fino y cementante en mezclas de mortero no estructural**

Rafael Leonardo Pedraza Álvarez, Juan Diego Ruiz Sánchez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

German Hernando Acevedo Calderón

Magíster en Ingeniería Estructural

Co-Director

Isis Karina Torres Ayala

Magíster en Ingeniería Estructural

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2025

Dedicatoria

A mi abuela, Teresa Mogollón: Gracias a tu apoyo y visión pude dar mis primeros pasos en esta carrera. Aunque te fuiste cuando el camino apenas empezaba y no pudiste verme llegar a la meta, hoy cumplo con el impulso que me diste. Gracias por creer en mí desde el primer día; este éxito es un tributo a tu memoria y es tanto tuyo como mío.

A mi familia: Por acompañarme incansablemente desde mis años de colegio, creyendo en mí antes de que yo mismo lo hiciera. Gracias por celebrar cada pequeño triunfo como si fuera propio y por ser el refugio donde siempre pude volver. Su amor y apoyo incondicional son la base de este título.

Rafael Leonardo Pedraza Álvarez

Agradecimientos

A mis padres, Marilyn Avella y Rafael Álvarez, por haberme apoyado y acompañado incondicionalmente durante todo este proceso. Gracias por ser el pilar fundamental de mi vida y por creer en mí en cada paso que doy; este logro es tanto suyo como mío.

Al MSc. Ing. Germán Acevedo, por su invaluable apoyo durante el desarrollo de este proyecto. A pesar de las adversidades e inconvenientes técnicos que enfrentamos, agradezco profundamente su paciencia, sus consejos y su guía constante, los cuales me han motivado a seguir profundizando en mis estudios profesionales.

A Lady Álvarez, por su apoyo incondicional. A pesar de las dificultades de salud que ha enfrentado, siempre encontró el momento para acompañarme y darme fuerzas cuando más lo necesité; tu valentía es una inspiración para mí.

A Jhonattan Álvarez y Caroll Skinner, por apoyarme desde la distancia. Gracias por su preocupación constante y por acompañarme de corazón en este largo camino, desde el primer día hasta la culminación de este proceso.

A mi pareja, Juliana Medina, por ser mi refugio y apoyo en los momentos de mayor frustración. Gracias por ayudarme a despejar la mente cuando sentía que no avanzaba y por estar a mi lado de tantas formas que siempre agradeceré. Asimismo, extendo mi gratitud a su madre, Rosalba Tavera, por acogerme como a un hijo en tan poco tiempo y por abrirme generosamente las puertas de su hogar.

Contenido

Introducción	19
1. Evaluación del uso de cascara de huevo y carbón de arroz como posible sustituto parcial del agregado fino y cementante en mezclas de mortero no estructural	22
1.1. Planteamiento del problema.....	22
1.2. Justificación.....	23
1.3. Objetivos	25
1.3.1. Objetivo general.....	25
1.3.2. Objetivos específicos	26
2. Marco referencial	26
2.1. Marco teórico	26
2.2. Marco conceptual	28
2.2.1 El mortero.....	28
2.2.2 El cemento	31
2.2.3 Los agregados.....	35
2.2.4 Residuos Agroindustriales.....	37
2.2.5 Economía circular.....	41
2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible	46
2.3. Marco legal.....	48
2.3.1 Decreto 586 de 2015.....	48
2.3.2 Norma ISO 14001.....	49
2.3.3 Resolución 472 del 28 de febrero de 2017	49
2.3.4 NSR-10 Título D.	50

2.3.5 NTC 220.....	50
2.3.6 NTC 237.....	50
2.3.7 NTC 3937.....	50
2.3.7 NTC 3356.....	51
2.3.8 NTC 221.....	51
2.3.8 ASTM C29.....	51
2.3.9 Plan Nacional de Desarrollo 2018-2020.....	51
3. Metodología.....	51
4. Desarrollo y resultados.....	54
4.1. Caracterización de materiales.....	54
4.1.1 Granulometría.....	54
4.1.2 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados finos.....	56
4.1.3 Densidad aparente suelta y compacta.....	58
4.1.4 Densidad del cemento con el frasco de Le Chatelier.....	58
4.1.5 Clasificación del agua.....	60
4.2 Ensayos de resistencia.....	60
4.2.1 Determinación de la resistencia de cubos de mortero.....	60
4.2.2 Determinación de la resistencia de cubos de mortero alterados.....	61
4.2.3 Replicación de las dosificaciones con mejores resultados en forma de hipótesis.....	63
5. Análisis estadístico de resultados de las hipótesis.....	69
5.1 Análisis de dispersión de las hipótesis.....	69
5.1.1 Análisis de dispersión de la hipótesis A.....	69
5.1.2 Análisis de dispersión hipótesis B.....	70

5.1.3 Análisis de dispersión hipótesis C	70
5.1.4 Análisis de dispersión de la hipótesis D	71
5.2 Anovas de resultados de las hipótesis	71
5.2.1 Anova de resultados de la hipótesis A	72
5.2.2 Anova de resultados de la hipótesis B	72
5.2.3 Anova de resultados de la hipótesis C	73
5.2.4 Anova de resultados de la hipótesis D	74
5.3 Método Mann-Whitney para los resultados de las hipótesis.....	75
5.3.1 Mann – Whitney de la hipótesis A	75
5.3.2 Mann – Whitney de la hipótesis B.....	76
5.3.3 Mann – Whitney de la hipótesis C.....	77
5.3.4 Mann – Whitney de la hipótesis D	78
5.4 Anova multivariable de las hipótesis	79
5.4.1 Anova multivariable de las hipótesis que solo sustituyen con cascaras de huevo	79
5.4.2 Anova multivariable de sustituciones de solo cascarillas de arroz.....	81
5.4.3 Anova multivariable de las dosificaciones de cascarillas de arroz y huevo	81
5.4.4 Anova multivariable del mortero de referencia vs tipo de residuo.....	82
5.5 Determinación del porcentaje óptimo de sustitución mediante regresión lineal para estimar el comportamiento del mortero en dosis no ensayadas	90
5.5.1 Regresión lineal para la hipótesis A	90
5.5.2 Regresión lineal para la hipótesis B	94
5.5.3 Regresión lineal para la hipótesis C	97

6. Viga realizada con la dosificación con mejor comportamiento en sus propiedades físico-mecánicas, empleando cáscara de huevo y carbón de arroz	100
6.1 Preparación de los materiales y molde	100
6.2 Resultados de la viga de mortero alterado.	100
7. Discusión.....	102
7.1 Hipótesis A - Reemplazar el cemento por carbón de arroz y la arena por cáscara de huevo triturada	104
7.2 Hipótesis B - Reemplazar el cemento por una cáscara de huevo troceada y la arena por carbón de arroz.....	108
7.3 Hipótesis C Reemplazar la arena por una cáscara de huevo partida o cemento por carbón de arroz (no mezclados)	110
7.4 Hipótesis D La sustitución combinada de cemento y arena con ambos residuos (todas las dosificaciones).....	113
8. Conclusiones	116
Referencias.....	119

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Clasificación según su tamaño</i>	32
Tabla 2. <i>Clasificación según su tamaño</i>	36
Tabla 3. <i>Contenido de mineral y materia orgánica de la cáscara de huevo</i>	40
Tabla 4. <i>Resultados granulometría.</i>	55
Tabla 5. <i>Resistencias de los cubos de mortero tipo no estructural sin ninguna sustitución.</i>	61
Tabla 6. <i>Dosificaciones de las mezclas.</i>	61
Tabla 7. <i>Resultados de los cubos de mortero alterados.</i>	62
Tabla 8. <i>Resultados hipótesis A.</i>	63
Tabla 9. <i>Resultados de la hipótesis B</i>	64
Tabla 10. <i>Resultados de la hipótesis C</i>	66
Tabla 11. <i>Resultados de la hipótesis D.</i>	68
Tabla 12. <i>Estimaciones de los parámetros de efectos fijos.</i>	82
Tabla 13. <i>Anova multivariable edad vs %C_Arroz.</i>	83
Tabla 14. <i>Post hoc edad - Referencia vs %C_Arroz.</i>	83
Tabla 15. <i>Post hoc del %C_Arroz referencia vs %C_Arroz.</i>	84
Tabla 16. <i>Anova multivariable - Edad vs %C_Huevo.</i>	86
Tabla 17. <i>Post hoc edad - Referencia vs %C_Huevo.</i>	86
Tabla 18. <i>Resumen de ajuste del modelo lineal.</i>	88
Tabla 19. <i>Pruebas ómnibus ANOVA.</i>	89
Tabla 20. <i>Estimaciones de los parámetros de efectos fijos.</i>	89
Tabla 21. <i>Valores de resistencia para aplicar la regresión lineal de la hipótesis A.</i>	91
Tabla 22. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis A.</i>	91

Tabla 23. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis A.....</i>	92
Tabla 24. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis A.....</i>	93
Tabla 25. <i>Valores de resistencia para aplicar la regresión lineal de la hipótesis B.....</i>	94
Tabla 26. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis B.....</i>	94
Tabla 27. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis B.....</i>	95
Tabla 28. <i>Determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis B.....</i>	96
Tabla 29. <i>Regresión lineal hipótesis C.</i>	97
Tabla 30. <i>Dosificación para la viga de mortero alterado.</i>	100
Tabla 31. <i>Cantidades para la viga de mortero alterado.....</i>	100

Lista de figuras

Figura 1. <i>Cascarilla de arroz</i>	38
Figura 2. <i>Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular</i>	44
Figura 3. <i>Beneficios de la Economía Circular</i>	45
Figura 4. <i>Estimación del metabolismo de la economía circular</i>	45
Figura 5. <i>Potencial de aprovechamiento materiales utilizados en la economía colombiana</i>	46
Figura 6. <i>Comparación de los resultados de la granulometría con los datos base de la norma</i> ..	56
Figura 7. <i>Comparación de los resultados de la densidad de la arena con los datos base</i>	57
Figura 8. <i>Comparación de los resultados de la gravedad específica con los datos base</i>	57
Figura 9. <i>Comparación de los resultados de la densidad con los datos base</i>	58
Figura 10. <i>Ficha de datos de seguridad del cemento</i>	59
Figura 11. <i>Comparación de los resultados de la densidad relativa del cemento con los datos base de la ficha técnica</i>	60
Figura 12. <i>Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis A</i>	64
Figura 13. <i>Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis B</i>	66
Figura 14. <i>Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis C</i>	67
Figura 15. <i>Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis D</i>	69
Figura 16. <i>Resistencias promedio por cada porcentaje de cascaras de huevo</i>	80
Figura 17. <i>Resistencias promedio por cada día de ensayo de cascaras de huevo</i>	80
Figura 18. <i>Resistencias promedio por cada día de ensayo de cascarillas de arroz</i>	81
Figura 19. <i>%C_Arroz vs Referencia</i>	85
Figura 20. <i>%C_Huevo vs Referencia</i>	88

Figura 21. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis A.</i>	92
Figura 22. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis A.</i>	93
Figura 23. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis A.</i>	93
Figura 24. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis B.</i>	95
Figura 25. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis B.</i>	96
Figura 26. <i>Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis B.</i>	97
Figura 27. <i>Gráfico regresión lineal hipótesis C - 7 días.</i>	98
Figura 28. <i>Gráfico regresión lineal hipótesis C - 14 días.</i>	98
Figura 29. <i>Gráfico regresión lineal hipótesis C - 28 días.</i>	99
Figura 30. <i>Máquina de flexión hidráulica.</i>	101
Figura 31. <i>Viga fallada.</i>	102
Figura 32. <i>Dosificación usada en Selvadurai.</i>	105
Figura 33. <i>Tabla de resultados obtenidos en Selvadurai.</i>	106
Figura 34. <i>Resultados obtenidos por el proyecto.</i>	106
Figura 35. <i>Grafica de resultados obtenidos en Mahmoud.</i>	107
Figura 36. <i>Resultados obtenidos en Akram.</i>	108
Figura 37. <i>Resistencia obtenida en la sustitución de cascara de huevo a los 14 días.</i>	109

Figura 38. <i>Resistencia obtenida en la sustitución de cascara de huevo a los 28 días.</i>	110
Figura 39. <i>Resistencia obtenida a los 28 días en el estudio de Poornima K B, Darshan, N. B., Manjunath, R. T., Revanasiddappa, K. R., & Sanjay, M. T.</i>	110
Figura 40. <i>Grafica de resistencia obtenida en el estudio de Karthick, A. S., Sathish Kumar, S., & Kabilan, S.</i>	112
Figura 41. <i>Grafica de resistencia obtenida en este proyecto.</i>	112
Figura 42. <i>Dosificaciones de mezcla usada en Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.</i>	114
Figura 43. <i>Porcentajes de sustitución usados en Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.</i>	114
Figura 44. <i>Diferencia de resistencia a la compresión del concreto.</i>	115
Figura 45. <i>Diferencia de resistencia del concreto en diferentes días.</i>	116
Figura 46. <i>Diferencia de resistencia del concreto con diferentes porcentajes de sustitución de huevo.</i>	116

Lista de apéndices

Apéndice A. *Granulometría de la arena*

Apéndice B. *Determinación de la densidad y porcentaje de absorción de la arena*

Apéndice C. *Densidad suelta y compacta*

Apéndice D. *Determinación de la densidad del cemento con el método de Le Chatelier*

Apéndice E. *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm*

Apéndice F. *Preparación de los morteros alterados*

Apéndice G. *Replicación de las dosificaciones con mejores resultados*

Apéndice H. *Análisis estadístico de resultados de las hipótesis*

Apéndice I. *Anovas de resultados de las hipótesis*

Apéndice J. *Prueba Mann-Whitney*

Apéndice K. *Anova multivariable*

Nota: véase archivos en fuente externa

Resumen

Esta investigación evaluó la factibilidad técnica de incluir desechos agroindustriales como sustitutos parciales del cemento y del agregado fino en morteros no estructurales. Se empleó cascara de huevo (pulverizada y triturada) y carbón de arroz calcinado con el fin de disminuir el uso de materiales convencionales. El objetivo principal fue determinar el impacto de estos reemplazos en el comportamiento mecánico de los cubos de mortero y establecer dosificaciones viables desde un enfoque estructural. Las mezclas se organizaron en cuatro hipótesis con diferentes combinaciones de sustitución, evaluadas mediante ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días conforme a la NTC 3356, y un ensayo de flexión según la ASTM C348 en una viga experimental. Los datos se analizaron mediante métodos estadísticos unifactoriales y multifactoriales para determinar la precisión y confiabilidad de los resultados. Se identificaron seis dosificaciones óptimas (A#11, A#15, B#3, B#7, C#3 y D#2) con resistencias entre 12.5 y 22 MPa, superando la resistencia mínima de un mortero no estructural. El uso moderado de cáscara de huevo mantuvo la resistencia mecánica, mientras que el carbón de arroz actuó favorablemente como adición mineral no reactiva. La mezcla C#3 presentó el mejor desempeño a compresión, demostrando la viabilidad técnica del uso combinado de estos residuos como alternativa sostenible en la fabricación de morteros.

Palabras clave: mortero no estructural, residuos agroindustriales, cáscara de huevo, carbón de arroz, resistencia a compresión

Abstract

This research evaluated the technical feasibility of including agro-industrial waste as partial substitutes for cement and fine aggregate in non-structural mortars. Eggshells (pulverized and crushed) and calcined rice husk charcoal were used to reduce the use of conventional materials. The main objective was to determine the impact of these replacements on the mechanical behavior of the mortar cubes and to establish viable dosages from a structural approach. The mixtures were organized into four hypotheses with different substitution combinations, evaluated by compression tests at 7, 14, and 28 days in accordance with NTC 3356, and a flexural test according to ASTM C348 on an experimental beam. The data were analyzed using unifactorial and multifactorial statistical methods to determine the accuracy and reliability of the results. Six optimal dosages were identified (A#11, A#15, B#3, B#7, C#3, and D#2) with strengths between 12.5 and 22 MPa, exceeding the minimum strength of a non-structural mortar. The moderate use of eggshell maintained the mechanical strength, while rice husk charcoal acted favorably as a non-reactive mineral additive. The C#3 mixture performed best in compression, demonstrating the technical feasibility of using these wastes in combination as a sustainable alternative in mortar manufacturing.

Keywords: mortar type s, agro-industrial waste, eggshell, rice charcoal, compressive strength

Glosario

Absorción: es la capacidad de un material para retener agua en sus poros cuando se está en contacto con el agua durante un tiempo determinado [1]

Agregados: se denominan agregados o áridos a los materiales inertes de forma granular, tanto naturales como artificiales, que, mezclados con cemento y agua, forman mortero o concreto utilizado en la construcción [2].

Agregado fino: es aquel material que pasa a través del tamiz No. 4 pero queda retenido en el tamiz No. 200, con tamaños nominales entre 4.76 mm y 74 micras [2].

Agroindustria: se refiere a la actividad que involucra la elaboración, transformación y comercialización de materias primas agrícolas, pecuarias o forestales, para la producción de alimentos y otros productos distribuidos en el mercado [3].

Avicultura: es el sector encargado del cuidado y manejo de especies avícolas, como pollos, gallinas y patos, con fines comerciales de producción de huevos y carne [4].

Cal: se trata de un polvo blanco compuesto principalmente por óxidos de calcio, obtenido mediante la calcinación de piedra caliza, que fragua al mezclarse con agua, similar al cemento [5].

Cantera: son áreas de explotación minera a cielo abierto, donde se extraen materiales utilizados en la construcción, como agregados y pétreos [6].

Compostaje: es una técnica que crea condiciones favorables para que los organismos descomponedores de residuos orgánicos produzcan abonos de alta calidad [7].

Curado: es el proceso que evita la evaporación del agua del mortero o concreto sin endurecer durante 24 horas, mediante la cobertura inmediata de las muestras con una lámina no absorbente para prevenir la expansión de los moldes y daños a los especímenes [8].

Desencofrado: es la remoción de los moldes que dan forma a una estructura de hormigón, los cuales pueden ser permanentes o temporales, empleados para mantener la forma del hormigón durante el fraguado [9].

Esfuerzo: son las fuerzas aplicadas a los elementos estructurales para resistir la deformación provocada por las cargas que soportan, incluyendo compresión, tracción, flexión, torsión y corte [10].

Especímenes: son muestras de concreto o mortero en estado fresco utilizadas para evaluar su resistencia, elaboradas en dos o tres muestras por edad y tipo de mezcla para observar la variación de la resistencia [10].

Escombreras: son sitios de disposición de desechos provenientes de industrias mineras, manufactureras o de construcción, así como el depósito de material estéril resultante de la demolición de estructuras, ya sea a cielo abierto o subterráneo [11].

GEI: son los Gases de Efecto Invernadero, componentes gaseosos de la atmósfera que pueden ser naturales o resultantes de actividades humanas, causantes del Efecto Invernadero al absorber y emitir radiación infrarroja, contribuyendo al cambio climático [13].

Material Cementante: es capaz de formar productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H), de manera individual o en combinación con otros materiales [14].

Mitigar: acción destinada a reducir la vulnerabilidad, disminuyendo el daño potencial sobre la vida y los bienes ante un evento [12].

Peso Unitario: relación entre el peso de una muestra compuesta por varias partículas y el volumen ocupado por dichas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido [2].

PIB: Producto Interno Bruto, valor de mercado de todos los bienes y servicios finales producidos en un país utilizando sus propios recursos de producción durante un período determinado [15].

Porosidad: capacidad de un agregado para absorber agua u otros líquidos, relacionada con el tamaño, cantidad y continuidad de los poros [2].

Puzolánico: tipo de aditivo que puede reemplazar parte del cemento en una mezcla de hormigón, compuesto por puzolana, un material silíceo que, al ser molido finamente y en presencia de agua, reacciona con el hidróxido de calcio del cemento, desarrollando propiedades cementantes.

Resistencia a flexión: capacidad de un material u objeto para soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal [16].

Introducción

El sector de la construcción ha sido un motor clave de la economía colombiana, contribuyendo significativamente al Producto Interno Bruto (PIB) con un 5.2% en el año 2021 [17]. Este crecimiento se ha visto impulsado por la creciente demanda de viviendas debido al aumento de la población y la urbanización. Sin embargo, este incremento ha resultado en una mayor producción de materiales de construcción, como el mortero, lo que a su vez ha aumentado la extracción de recursos naturales esenciales para esta industria.

La producción de cemento y la extracción de agregados como la grava y la arena son actividades centrales en la industria de la construcción. En Colombia, la producción de cemento alcanzó 1.140,8 miles de toneladas en febrero de 2023, mientras que a nivel mundial se produjeron 4.6 millones de toneladas en el año 2016 [18]. La producción de cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo significativamente al cambio climático [20]. Además, la extracción de materiales como la grava y la arena tiene impactos negativos en el medio ambiente, incluida la alteración de la estabilidad del suelo y la escasez de recursos hídricos.

Como respuesta a estos desafíos, se han buscado alternativas para reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción, incluyendo el uso de materiales reciclados y residuos agroindustriales. Una opción es el uso de la cascarilla de arroz y las cáscaras de huevo, producidas en grandes cantidades y a menudo desechadas, representan una oportunidad para ser utilizadas como sustitutos parciales de la arena y el cemento en la producción de mortero. Esto podría no solo reducir la cantidad de desechos generados, sino también las emisiones de carbono asociadas con la producción de cemento [21].

En esta investigación, se explorará el potencial de la ceniza de la cascarilla de arroz y las cáscaras de huevo como sustitutos parciales de la arena y el cemento en la producción de mortero.

Se llevará a cabo una caracterización detallada de estos materiales, para obtener ceniza de cáscara de arroz con propiedades eficaces de ceniza hidráulica, la literatura especializada indica que debe someterse a un proceso controlado de calcinación a temperaturas que oscilan entre 600 °C y 800 °C durante 4 a 24 horas, para garantizar que la sílice permanezca en un estado amorfo y altamente reactivo [72]. Sin embargo, este tipo de tratamiento térmico requiere el uso de hornos especializados, un elevado consumo de energía y un control continuo de la temperatura y el tiempo, lo que supone una importante inversión en infraestructura y operaciones, especialmente para proyectos experimentales de pequeña escala. Además, las temperaturas superiores a 800 °C conducen a la cristalización de la sílice, lo que reduce significativamente su reactividad, por lo que este proceso es técnicamente arriesgado si no se lleva a cabo en condiciones controladas [74]. En cambio, la producción de carbono de arroz por pirólisis o combustión controlada a temperaturas inferiores a 500 °C no requiere equipos complicados ni grandes cantidades de energía, por lo que el carbono de arroz puede obtenerse de forma más sencilla y económica. Aunque este material no posee propiedades significativas para el mortero esperado, puede funcionar plenamente como árido poroso ligero y contribuir al comportamiento físico del mortero sin comprometer la viabilidad del estudio. Por lo tanto, desde el punto de vista de la rentabilidad, se descartó la calcinación de la cascarilla y se optó por el uso de carbón de arroz. Mientras tanto la cascara de huevo se usó en 2 formas, la primera fue triturada en pequeños trozos golpeando o presionando las cascaras para dejarlas en este estado de esta forma ocuparía el espacio de la arena sustituida y la segunda pulverizándola, usando procesadores de comida para obtener el carbonato del calcio presente dentro de la cascara.

Además, se explorarán relaciones estadísticas entre el comportamiento resistente del mortero preparado con las indicaciones de la NTC 220 y los diferentes porcentajes y tipos de

sustitución presente en cada hipótesis, mediante el uso de modelos de ajuste basados en los datos experimentales obtenidos. Estos modelos permitirán identificar tendencias y estimaciones preliminares que podrían orientar futuros desarrollos en materiales de construcción más sostenibles y eficientes en el uso de recursos.

Este proyecto de grado se estructura en tres partes fundamentales. La primera sección incluye la formulación del problema, los objetivos y los fundamentos de la investigación, en la que se destaca la relevancia de utilizar desechos agroindustriales en materiales de construcción. La segunda sección aborda la revisión bibliográfica, que incluye referencias nacionales e internacionales, además del marco teórico que respalda la utilización de cáscara de huevo y carbón de arroz como reemplazos parciales en morteros. Finalmente, la tercera sección trata sobre el diseño metodológico, la descripción de los materiales, el desarrollo de la experimentación, el análisis multivariado estadístico y expone los hallazgos, el debate y las conclusiones que cumplen con los objetivos propuestos.

1. Evaluación del uso de cascara de huevo y carbón de arroz como posible sustituto parcial del agregado fino y cementante en mezclas de mortero no estructural

1.1. Planteamiento del problema

La industria de la construcción se destaca como uno de los principales promotores del crecimiento económico de Colombia, representando el 4.9% del Producto Interno Bruto (PIB) en 2017, un aumento significativo desde el 1.8% en 2001 [20].

El crecimiento urbano y la demanda de edificaciones han aumentado considerablemente, proyectándose que 18 millones de personas vivirán en Colombia en las próximas décadas [20]. Este crecimiento ha ejercido presión sobre zonas ambientalmente sensibles, contribuyendo al 10.5% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el país [20].

La industria de la construcción también es responsable del 40% de los residuos generados en Colombia y consume el 60% de los materiales extraídos de la tierra, con un alto consumo energético y emisión de CO₂ [21].

El cemento es uno de los materiales más producidos en el mundo y representa un costo significativo en la elaboración del mortero, siendo Colombia el quinto mayor productor en Latinoamérica y el Caribe [19, 22]. El problema está en que su producción conlleva un alto impacto ambiental debido a las emisiones de CO₂ y la extracción de recursos no renovables como la piedra caliza [23]. Además, la extracción de agregados como arena y grava, esenciales en la construcción, ha llevado a una sobreexplotación de recursos naturales, contribuyendo a inundaciones y agotamiento de acuíferos [24].

Los residuos agroindustriales tienen un potencial significativo para ser aprovechados y mitigar el impacto ambiental. En este contexto, este trabajo propone reutilizar residuos como el

tamo de arroz y la cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento y la arena en mezclas de mortero, evaluando su impacto en la resistencia del mortero [25].

Los ensayos de laboratorio según la normativa NTC – 3356 permitirán determinar la viabilidad de esta propuesta y su contribución a la sostenibilidad, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

1.2. Justificación

El auge experimentado por la industria de la construcción tanto en Colombia como a nivel global en la última década ha marcado un hito significativo para este sector, generando una alta demanda de materiales de construcción. El cemento, como componente fundamental del mortero y uno de los materiales más utilizados en la construcción, ha requerido una producción considerable, estimada en aproximadamente 3.99 mil millones de toneladas a nivel mundial en 2018 según The European Cement Association. Sabiendo esto debemos reconocer que la producción de cemento conlleva un alto consumo de energía en su proceso de extracción, molienda, calcinación de la piedra caliza y transporte, con un consumo estimado de 60 a 130 litros de gasolina o equivalente y alrededor de 110 kWh de electricidad por tonelada producida [19].

Por otro lado, la agroindustria, que representa el 6.2% del PIB en Colombia, también genera una cantidad significativa de residuos que en su mayoría no reciben un tratamiento adecuado, lo que resulta en alteraciones ambientales en los medios abióticos, bióticos y socioeconómicos. Por ejemplo, en la industria arrocera, se genera una gran cantidad de cascarilla de arroz como residuo, que a menudo se desecha sin control, lo que causa contaminación del suelo y de cuerpos de agua debido a su alto contenido de sílice y su abundancia. Además, la quema de estos residuos genera emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto

invernadero (GEI) [26]. De manera similar, en el sector avícola, la producción de huevos genera grandes cantidades de residuos de cáscara de huevo, que albergan insectos y bacterias nocivas y, si se desechan incorrectamente, pueden contaminar suelos y aguas, además de liberar GEI a la atmósfera [27].

La dinámica de consumo de recursos en la industria de la construcción y la generación de residuos en la agroindustria resalta la importancia de identificar procesos para la reutilización y reincorporación de estos residuos en la cadena de valor. Estas acciones están alineadas con los esfuerzos internacionales y nacionales en materia ambiental, incluidos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Plan Nacional de Desarrollo (PND) en Colombia, que promueven la construcción sostenible, el consumo responsable y la mitigación de los impactos ambientales [25].

Este proyecto de investigación propone utilizar residuos agroindustriales, como la cáscara de huevo y la cascarilla de arroz, como sustitutos parciales de las materias primas empleadas en la producción de mortero. Estudios han demostrado que la cáscara de huevo está compuesta principalmente de carbonato de calcio, el cual es un componente clave del cemento, lo que sugiere la posibilidad de sustituir parcialmente el cemento en la mezcla de mortero [28].

La expansión del sector constructivo en Colombia, particularmente en la región de Santander, ha provocado un incremento en la necesidad de materiales. El cemento, elemento fundamental del mortero, es muy empleado, aunque su fabricación requiere una gran cantidad de energía y recursos.

Al mismo tiempo, la agroindustria en Santander genera una considerable cantidad de desechos, tales como la cascarilla de arroz y la cáscara de huevo, que frecuentemente son tratados de forma incorrecta, provocando problemas medioambientales. Este proyecto tiene como objetivo incluir estos desechos como alternativas parciales en la fabricación de mortero de no estructural.

La cascarilla de arroz es particularmente atractiva por su elevado contenido de sílice, que se asemeja a la arena empleada en el mortero y tiene la capacidad de potenciar las características mecánicas sin afectar la resistencia. El mortero de no estructural, con sus requisitos estructurales más bajos, facilita una experimentación segura y brinda un balance entre resistencia y manejabilidad, resultando perfecto para este análisis.

Este proyecto, a escala regional, podría motivar a las industrias de Santander a implementar prácticas más sustentables, fomentando la economía circular y optimizando la administración de desechos. Desde el punto de vista nacional, apoyaría las metas de sostenibilidad, en concordancia con el Plan Nacional de Desarrollo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, fomentando una industria de la construcción más consciente y respetuosa con el medio ambiente. Esta propuesta no solo busca la reutilización y reciclaje de desechos, sino también el progreso hacia la edificación sustentable, promoviendo transformaciones positivas a nivel regional y nacional.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la cascara de huevo y el carbón de arroz al sustituir parcialmente los agregados finos y el material cementante en mezclas de mortero no estructural, mediante la caracterización de las propiedades físicas de los materiales y el análisis de las propiedades físico-mecánicas.

1.3.2. *Objetivos específicos*

Determinar la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados finos y material cementante empleados en la realización de la mezcla.

Estimar las posibles dosificaciones de las mezclas de mortero no estructural al momento de reemplazar parcialmente los agregados finos y material cementante con los residuos agroindustriales.

Analizar las diferencias de las resistencias a compresión de una mezcla de mortero no estructural alterada con inclusión de residuos agroindustriales con una mezcla de mortero no estructural en condiciones normales.

2. Marco referencial

2.1. Marco teórico

Urmi, Awall y Nawar, en su ponencia "*Partial Replacement of Eggshell and Rice Husk Powder as Cement in Concrete*" (2024), Ampliaron los conocimientos sobre los aditivos mediante el estudio de la sustitución parcial del cemento por ESP y RHA en mezclas de concreto. Llegaron a la conclusión de que una sustitución del 3 % por ESP daba como resultado una resistencia óptima de 24,53 MPa, lo que constituye una referencia importante para determinar el grado óptimo de sustitución en mezclas de concreto [85].

Koteswara Rao et al., en su estudio experimental "*Experimental Study to Check the Effect of Egg Shell Powder and Rice Husk Ash on the Property of Concrete*" (2019), se centraron en el efecto combinado del ESP y el RHA sobre las propiedades del concreto. Sus resultados mostraron

que la resistencia óptima se alcanzaba con una adición del 5 %, lo que proporciona una referencia importante para determinar el grado óptimo de sustitución en las mezclas de concreto [81].

Selvadurai y Kumar, en su investigación titulada "*Compressive strength of cement mortar containing Eggshell*" (2021), investigaron la viabilidad de añadir ESP como aglutinante adicional en mezclas de mortero. Llegaron a la conclusión de que el uso de cáscaras de huevo tiene una influencia directa en la resistencia a la compresión, lo que constituye una referencia importante para determinar la proporción óptima de sustitución en las mezclas de mortero [83].

Kumar, Sathish Kumar y Kabilan, en su revisión titulada "*A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete*" (2018), Presentaron un análisis sobre el uso del ESP como sustituto del cemento. Su objetivo era determinar los efectos de este aditivo en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, lo que podría ser útil para comprender la microestructura del mortero [86].

Shah et al., en su artículo "*Investigating the Effect of Rice Husk Biochar on Mechanical Properties and Chemical Resistance of Concrete*" (2024), llevaron a cabo investigaciones experimentales para evaluar las propiedades de resistencia del concreto fabricado con carbón biológico procedente de cáscaras de arroz como sustituto del cemento. Su estudio podría ser relevante para aplicaciones con RHA, ya que aborda los requisitos específicos en términos de resistencia y durabilidad, lo que podría ser útil para la formulación de mezclas de concreto [84].

Mahmoud et al., en su investigación titulada "*Evaluation of rice husk biochar influence as a partial cement replacement material...*" (2025), investigaron la sustitución del cemento en el concreto normal por biocarbón procedente de cáscaras de arroz. Analizaron los efectos de la proporción de sustitución en las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales del concreto

y proporcionaron información valiosa sobre la influencia de una alta proporción de aditivos puzolánicos en las propiedades del concreto [82].

Poornima et al., en su revisión titulada "*A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete*" (2019), ofrecieron un análisis crítico de la incorporación de residuos en la composición de los materiales de construcción tradicionales. Su enfoque en los efectos de los aditivos en las propiedades físicas y mecánicas podría ser útil para comprender la microestructura del mortero con aditivos agroindustriales [86].

2.2. Marco conceptual

2.2.1 El mortero

El mortero es una mezcla homogénea compuesta principalmente por un aglomerante como el cemento, agua y los agregados finos. Esta mezcla, una vez endurecida, forma un material con propiedades de cohesión y adherencia.

2.2.1.1 Propiedades Físico-mecánicas. Las propiedades físico-mecánicas del mortero son evaluadas a través de ensayos de laboratorio, los cuales establecen la calidad del mortero mediante su comparación con la normativa establecida por la NTC 3356. Algunas de las propiedades más destacadas son:

2.2.1.1.1 Peso específico. La densidad o peso específico del cemento se define como la relación entre su peso y su volumen. Suele oscilar entre 3.08 y 3.20, aunque en el caso de los cementos con aditivos, tiende a ser menor debido a la reducción en el contenido de clínker. Es

importante tener en cuenta que el peso específico no determina la calidad del cemento, pero se utiliza en su diseño.

2.2.1.1.2 Superficie específica (finura). La finura es una de las propiedades más cruciales del cemento, ya que influye directamente en su proceso de hidratación.

La hidratación de los granos de cemento ocurre del exterior hacia el interior; luego el área superficial de la partícula de cemento constituye el material de hidratación, y el tamaño de los granos (su finura) tiene gran influencia en la velocidad de hidratación, en el desarrollo de calor, en la retracción y en el aumento de resistencia con la edad [33].

A medida que el cemento es más fino, su endurecimiento se acelera y adquiere una alta resistencia en un período más corto. Sin embargo, esta característica lo hace más susceptible a fisuras y a la hidratación ambiental, lo que reduce su vida útil.

2.2.1.1.3 Retracción y fisuras. El mortero en estado de pasta tiende a contraerse durante el endurecimiento y los primeros dos meses de hidratación. En los morteros normales, esta retracción es del orden de 0,015%. Estas fisuras se presentan cuando los esfuerzos son mayores a la resistencia de la propia masa.

Las retracciones pueden ser debidas a condiciones hidráulicas o a condiciones térmicas. Las de orden hidráulico son motivadas por la composición mineralógica del cemento, como:

- Alto contenido de silicato tricálcico.
- Alto contenido de aluminato tricálcico.
- Alto contenido de álcalis.
- Fraguado y endurecimientos rápidos.

- Bajo contenido de yeso.

Las de orden térmico se deben a:

- Finura del cemento.
- Bajo poder de retención de agua por parte del cemento.
- Alta dosificación del cemento.
- Alto calor de hidratación del cemento.

Cuando las retracciones son grandes pueden producir fisuras; sin embargo, existen causas ajenas al cemento que producen fisuración, como:

- Asentamiento o desplazamiento de la propia estructura.
- Deformaciones que experimenta el terreno de cimentación, por sobrecarga.
- O debidas el medio ambiente, como son: baja humedad relativa, altas temperaturas

o vientos fuertes que producen desecación rápida del mortero fresco. [33].

2.2.1.2 Residuos adicionados al mortero. Teniendo en cuenta que el mortero es uno de los materiales más utilizado en la industria de la construcción, en varios países se ha tomado como alternativa reutilizar residuos y adicionarlos en el mortero para la creación de nuevas obras debido a la preocupación por el medio ambiente y la economía.

Teniendo esto en cuenta, el uso de agregados reciclados (RA) como reemplazo de agregados naturales (NA) en la producción de mortero se considera como uno de los métodos más beneficiosos para un reciclaje efectivo de materiales y por lo tanto aumenta la sostenibilidad en la industria de la construcción [34].

Algunos estudios realizados muestran que las propiedades de durabilidad y resistencia del mortero disminuyen cuando se reemplaza el agregado natural por Agregado de Residuos (RA).

Por otra parte, estudios más avanzados han revelado que hay tres tipos principales de RA: hormigón triturado, construcción de mampostería o escombros mixtos. Generalmente, se considera un 90% de agregado de mortero triturado como RA para agregar a la mezcla de mortero, y, en igual proporción se considera la mampostería de arcilla, sin embargo, los escombros mixtos (mampostería de arcilla y mortero triturado) varían de acuerdo con las especificaciones existentes.

2.2.2 El cemento

El cemento es el material más empleado en la construcción debido a sus capacidades para proporcionar durabilidad, características estéticas y una excelente resistencia a la compresión. "El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el clínker principal ingrediente del cemento, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento" [35].

2.2.2.1 Composición del cemento. Los principales elementos que componen el cemento portland son:

Cal (CA O), sílice (Si O₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃). Como pocas veces se encuentran en la naturaleza juntos y en las proporciones requeridas, para la fabricación del cemento generalmente se hace necesario mezclar sustancias minerales que los contienen, como calizas por el aporte de cal y las arcillas por el aporte de alúmina y óxido de hierro; en algunas ocasiones es necesario agregar directamente óxido de hierro o arenas silíceas, para ajustar las proporciones de cada compuesto con el fin de obtener reacciones químicas equilibradas. Una tercera sustancia

necesaria en la fabricación del cemento es el yeso hidratado que se adiciona al clinker durante la molienda con el fin de retardar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento [33].

También, en el cemento se hacen presentes los siguientes compuestos complementarios, que son añadidos para el buen comportamiento del material:

- Óxido magnésico.
- Alcalis.
- Azufre.
- Cloruros.
- Fósforo.

2.2.2.2 Composición química del cemento. El cemento no es un compuesto puro, por lo tanto, no se le puede asignar una fórmula química específica. Sin embargo, está compuesto por una cantidad determinada de elementos conocidos, que al ser combinados pueden tener un comportamiento deducible, manipulable y controlable gracias a las leyes de la química pura, por medio de relaciones estequiométricas. "Químicamente se define el cemento portland como una mezcla de composición heterogénea y finamente pulverizada" [33], cuya composición es:

Tabla 1. *Clasificación según su tamaño*

<i>Nombre del compuesto</i>	<i>Fórmula química</i>	<i>Abreviatura</i>
A) Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
B) Silicato Dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
C) Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
D) Ferroaluminato tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF
E) Yeso natural	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	
F) Óxidos menores de Ca, Mg, Na, K, Mn, Tl, P, Fe		

Adaptado de El concreto y otros materiales para la construcción [33].

2.2.2.3 Propiedades físicas y mecánicas del cemento. Estas propiedades deben ser medidas mediante ensayos, cuyos resultados deben ser comparados con las especificaciones de la norma NTC 121.

2.2.2.3.1 Peso específico. “La densidad o peso específico se define como la relación de peso a volumen; su valor varía entre 3,08 a 3,20 g/cm³ para el cemento portland tipo I, pero el cemento que tiene adiciones tiene un peso específico menor porque el contenido de Clinker es menor” [33].

Esta característica no refleja la auténtica excelencia del cemento, aunque puede ser útil en la elaboración de combinaciones de ingredientes, ya que señalan si un mortero incluye adiciones. Los procedimientos de prueba para evaluar este atributo se encuentran detallados en la normativa NTC 221.

2.2.2.3.2 Superficie específica. Es una característica fundamental del cemento, ya que está estrechamente ligada a su proceso de hidratación. Este proceso de hidratación tiene lugar desde la superficie hacia el interior del cemento, y el tamaño de partícula (finura) ejerce una influencia significativa en la velocidad óptima de este proceso.

Cuando el cemento es muy fino, endurece más rápidamente y por lo tanto desarrolla alta resistencia en menor tiempo; sin embargo, libera mayor cantidad de calor y por ende aumenta la retracción y la susceptibilidad a la fisuración, además una molienda fina aumenta los costos de producción y hace que el cemento sea más susceptible a hidratarse con la humedad ambiental, por lo que su vida útil es más corta. [33].

La determinación de la fineza debe llevarse a cabo en laboratorio, y el ensayo correspondiente está especificado en la normativa NTC 33, que estima la fineza del cemento utilizando el aparato de permeabilidad al aire de Blaine.

2.2.2.3.3 Resistencia mecánica. La resistencia mecánica es la característica más significativa cuando se utiliza cemento para aplicaciones estructurales.

Para medir la resistencia mecánica del cemento, se fabrican probetas de mortero, empleando arena normalizada de Ottawa con una gradación abierta, compuesta por tres tamaños y con una proporción determinada de 2,75 partes de esta arena por una parte de cemento, utilizando la cantidad de agua necesaria para que el mortero tenga una fluidez entre 110 y 115. [33].

La normativa que rige los parámetros de los ensayos para determinar la resistencia mecánica del cemento en probetas de mortero es la NTC 220.

2.2.2.4 Clasificación del cemento. La clasificación para Colombia según la NTC 30 es:

- Cemento Portland tipo 1. Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.
- Cemento Portland tipo 1M. Alcanza resistencias superiores a las del tipo 1.
- Cemento Portland tipo 2. Es resistente a la acción moderada de sulfatos y el desprendimiento de calor es menor que en los cementos normales.
- Cemento Portland tipo 3. Alcanza alta resistencia inicial.
- Cemento Portland tipo 4. El desprendimiento de calor es bajo.
- Cemento Portland tipo 5. Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- Cemento Portland Blanco. Se elabora con materias primas seleccionadas que no contienen óxido

de hierro, por eso la coloración. Se usa para decoración. [33].

2.2.3 Los agregados

Los agregados, definidos como "un conjunto de materiales de composición mineral, naturales o artificiales, generalmente inertes" [2], son componentes esenciales en la mezcla de mortero y desempeñan un papel crucial en la economía, durabilidad y estabilidad de las obras civiles. Estos ocupan un volumen considerable dentro de la mezcla, representando del 65% al 85% en el mortero, del 92% al 96% en el mortero asfáltico, y del 75% al 90% en los pavimentos [2]. Por tanto, es crucial estudiar y comprender las propiedades de los agregados.

Se distinguen dos tipos principales de agregados: el agregado fino, que pasa por el tamiz No. 4 pero es retenido en el tamiz No. 200 (con tamaños entre 4.76mm y 74 μ m), y el agregado grueso o grava, que es retenido en el tamiz No. 4 (con tamaños entre 7.6cm y 4.76mm) [2]. Además, se consideran como finos aquellas partículas que pasan a través del tamiz No. 200, con tamaños comprendidos entre 0.074mm y 0.002mm.

2.2.3.1 Clasificación de los Agregados. Estos pueden ser clasificados según su procedencia, tamaño y densidad.

2.2.3.1.1 Clasificación según su procedencia. La clasificación de los agregados según su origen se basa en si son naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de canteras o son depositados por el flujo de los ríos. Los materiales extraídos de los ríos tienden a tener una forma redondeada y una superficie lisa, mientras que los obtenidos de canteras presentan una superficie rugosa y una forma angulosa debido al método de extracción [2].

Por otro lado, los agregados artificiales se generan a partir de procesos industriales, como la producción de limaduras de hierro, arcillas expandidas, o escorias de altos hornos. Sin embargo, para la elaboración de mortero, se emplean materiales como la cascarilla de arroz, de palma, café, etc., que se mezclan con los agregados naturales para reducir costos [2].

2.2.3.1.2 Clasificación según su tamaño. A continuación, se muestra una tabla en la cual se muestra la clasificación de los agregados dependiendo el tamaño de sus partículas.

Tabla 2. *Clasificación según su tamaño*

<i>Tamaño de la partícula en mm</i>	<i>Denominación corriente</i>	<i>Clasificación</i>
Pasante del Tamiz N°200 inferior a 0.002 mm Entre 0.002 - 0.074 mm	Arcilla	Fracción fina o finos
	Limo	
Pasante del Tamiz N°4 retenido en el Tamiz N°200. Es decir, entre 4.76 mm y 0.074 mm	Arena	Agregado fino
Retenido en el tamiz N°4	Gravilla	Agregado grueso
Entre 4.76 mm y 19.1 mm (N°4 y 3/4")	Grava	
Entre 19.1 y 50.8 mm (3/4" y 2")	Piedra	
Entre 50.8 mm y 152.4 mm (2" y 6")	Rajón, Piedra bola	
Superiores a 152.4 mm (6")		

Adaptado de El concreto y otros materiales para la construcción [2].

2.2.3.1.3 Clasificación según su densidad. Los agregados también pueden ser clasificados según su densidad, que es la masa por unidad de volumen, considerando los espacios vacíos. Esta clasificación es importante para determinar el peso del producto final. Según este criterio, los agregados se pueden categorizar como ligeros, con una densidad entre 480 y 1040 Kg/m³, o como normales, con una densidad entre 1300 y 1600 Kg/m³.

2.2.4 Residuos Agroindustriales

Según Saval, los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización. Estos materiales ya no son útiles para el proceso que los originó, pero pueden ser aprovechados o transformados para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social [36].

Cada sector agroindustrial produce residuos específicos, y diferentes sectores tienen estrategias específicas para el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos. Además, estos residuos han sido objeto de recientes investigaciones, que incluyen residuos de caña de azúcar, cascarilla de arroz, desechos cítricos, cáscara de plátano, entre otros [25].

2.2.4.1 Impactos en el ambiente. La contaminación se define como el cambio físico, químico, radiológico o biológico de un recurso (aire, tierra o agua) causado por el hombre o actividades humanas, que resulta perjudicial para la existencia, fin o uso potencial del recurso [37]. Los residuos agroindustriales representan un importante foco de contaminación debido a su volumen de producción, pudiendo afectar la salud y los ecosistemas si no se gestionan adecuadamente [38].

Muchos de estos residuos son incinerados o depositados en rellenos sanitarios, lo que provoca la liberación significativa de dióxido de carbono, contaminación de recursos hídricos, olores desagradables, proliferación de animales e insectos, entre otros efectos negativos [39]. La industria agroalimentaria es una de las que más impacto genera en el medio ambiente, debido a la producción de diversos residuos sólidos, líquidos o gases en diferentes etapas de su procesamiento [25].

Los residuos agroindustriales suelen estar compuestos principalmente por materia sólida y orgánica, con una tasa de degradación muy baja. Cuando no se aprovechan, tienden a ser depositados en áreas sin control, lo que aumenta los procesos erosivos y contamina las fuentes hídricas [40].

2.2.4.2 Cascarilla o tamo de arroz. La cascarilla de arroz es un subproducto generado por la agroindustria, resultado del proceso de molienda del arroz cosechado en los campos de cultivo. Se encuentra en la capa exterior del grano maduro y debe ser eliminada para la comercialización del arroz [41].

Esta cascarilla tiene una textura abrasiva y quebradiza, con un color que varía entre el pardo rojizo y el púrpura oscuro. Debido a su baja densidad, ocupa un gran volumen cuando se acumula; su peso específico es de aproximadamente 125 kg/m^3 , lo que significa que una tonelada de cascarilla ocupa alrededor de 8 m^3 . Además, tiene un alto poder calórico de $3.281,6 \text{ Kcal/kg}$ y su contenido elevado de sílice (alrededor del 20%) resulta en una biodegradabilidad muy baja [42].

Figura 1. *Cascarilla de arroz*



Adaptado de Banco de imágenes de Google, [3]

La cascarilla de arroz tiene diversas aplicaciones, que incluyen:

- Conversión de biomasa: se pueden obtener azúcares que pueden ser convertidos en otros compuestos químicos orgánicos, como etanol y furfural.
- Elaboración de abonos y sustratos para el cultivo de hongos.
- Producción de papel y pulpa.
- Utilización en materiales de construcción.
- Uso como combustible.
- Obtención de productos de silicio, tanto a partir de la cascarilla como de sus cenizas [43].

2.2.4.2.1 Cascarilla de arroz en materiales de construcción. La cascarilla de arroz presenta características que la hacen útil en varios campos de la ingeniería. Debido a su alto contenido de sílice, posee una dureza elevada [44], lo que la hace resistente y capaz de soportar altas temperaturas, evitando así su combustión fácil. Esto la convierte en un material adecuado para ser utilizado en la fabricación de elementos de mortero [42].

En estudios previos, se han registrado datos de adiciones de hasta el 20% de cascarilla de arroz como agregado fino en la producción de cubos de mortero.

2.2.4.3 Cascara de huevo. La cáscara del huevo está formada por varias capas. Estas incluyen una capa de piel porosa, una capa de calcita o carbonato de calcio, y dos membranas de cáscara de huevo [45]. Además, se describe que la estructura de la cáscara de huevo consta de membranas de revestimiento, una zona mamilar, una reserva de calcio empalizada y una cutícula. En la superficie del cuerpo de la cáscara, hay alrededor de 7.000 a 17.000 poros distribuidos de manera desigual para el intercambio de agua y gas [45].

2.2.4.3.1 Cutícula de la cáscara de huevo y su composición. La cutícula es la capa más externa del huevo, con un grosor de aproximadamente 10-30 μ m. Cubre los canales de los poros, lo que sugiere que esta estructura puede proteger al huevo de la humedad y los microorganismos [45]. Además, la cutícula contiene una cantidad significativa de pigmentos, como protoporfirina, biliverdina y su quelato de zinc, que son responsables de dar color a los huevos [45].

2.2.4.3.2 Composición química de la capa de calcita. La cáscara de huevo representa aproximadamente el 10% de la masa total del huevo de gallina. En cuanto a su composición, se estima que contiene alrededor del 94% de carbonato de calcio, un 1% de carbonato de magnesio, otro 1% de fosfato de calcio y un 4% de materia orgánica, si bien estos porcentajes pueden variar dependiendo del tipo de huevo y la especie [45].

Además, se señala que la cáscara de huevo contiene aproximadamente un 39% de calcio elemental, y su biodisponibilidad de calcio es tan alta como la del carbonato de calcio (CaCO_3) [45].

Tabla 3. *Contenido de mineral y materia orgánica de la cáscara de huevo*

	Promedio	Desviación estándar
M. Orgánica	16.1	4.6
M. Inorgánica	83.9	5.0
Calcio	38.2	3.5
Carbonato	44.3	3.2
Sodio	0.51	0.09
Fosfato	0.44	0.06
Sulfato	0.32	0.07
Potasio	0.14	0.15
Estroncio	0.14	0.02
Flour	1.8x10 ⁻⁶	1.1x10

Adaptado de Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color [45].

2.2.4.3.3 Generación de residuos de cáscara de huevo a nivel mundial. Debido a que la cáscara de huevo representa aproximadamente el 10% del peso total del huevo, se estima que los residuos generados podrían alcanzar entre 6.2 y 6.82 millones de toneladas por año a nivel mundial. Se prevé que la producción mundial de huevos aumente de 64.2 millones de toneladas en 2010 a 86.8 millones de toneladas para el año 2030 [45].

En la Unión Europea, se desecharon alrededor de 999.000 toneladas de cáscara de huevo en 2015. En Egipto, se produjeron aproximadamente 310.000 toneladas de cáscara de huevo al año durante el período de 2001 a 2005. Asimismo, en Estados Unidos se generan anualmente cerca de 150.000 toneladas de desechos de cáscara de huevo, de las cuales el 26.3% se depositan en vertederos municipales [45].

Dado este volumen de residuos, la cáscara de huevo, un subproducto de la industria de los ovoproductos suele ser desechada en rellenos sanitarios sin tratamiento previo, lo que conlleva la aparición de malos olores, la proliferación de plagas y el crecimiento microbiano a medida que la cáscara de huevo se degrada [45].

2.2.5 Economía circular

La economía circular surge como respuesta a la creciente demanda de materias primas y recursos naturales para una población en aumento, a la interdependencia entre países para su suministro y a los impactos del cambio climático y la contaminación derivados de altos volúmenes de desechos [46]. En Colombia, su implementación inició con el CONPES 3874, que establece la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos y reconoce, articula y potencia iniciativas existentes mediante una agenda de trabajo conjunta entre los Ministerios de Comercio, Industria y Turismo; Ambiente y Desarrollo Sostenible; Vivienda, Ciudad y Territorio; Agricultura

y Desarrollo Rural; Transporte; Educación; y Minas y Energía, junto con el DNP y el DANE, además de varios programas y acuerdos sectoriales [46]. Según la Ellen MacArthur Foundation, la economía circular promueve sistemas de producción y consumo que optimizan materiales (incluida agua y energía), basados en la regeneración de los ecosistemas, el uso circular de flujos de materiales y la prolongación de su vida útil mediante innovación y alianzas compatibles con el desarrollo sostenible [47].

2.2.5.1 Tipologías de innovación. La implementación de la economía circular implica ajustes en innovación y un aumento en los niveles de transformación, desde la valoración de los residuos hasta el cierre del ciclo de los materiales y la extensión de la vida útil de los productos. Cada una de las tipologías de economía circular se ajusta a un modelo de negocios con cadenas de valor distintas [46].

2.2.5.1.1 Primera tipología. Esta tipología introduce un modelo de aprovechamiento de residuos, que establece que "El material desechado por un usuario se utiliza como materia prima por otro" [48].

Esta tipología de iniciativas incluye tecnología para el reciclaje, aprovechamiento y tratamiento de recursos, que involucra sistemas de recolección y separación en la fuente, limpieza y procesamiento de materiales reciclados y su comercialización hacia nuevas aplicaciones, así como el aprovechamiento energético de residuos [46].

2.2.5.1.2 Segunda tipología. Esta tipología presenta un modelo circular que busca reutilizar la mayor cantidad de productos posible durante su ciclo de vida, donde "El material es reutilizado en su misma aplicación o en un nuevo uso" [48]. Las iniciativas del modelo circular

tienen como objetivo prolongar la vida útil de productos y materiales, evitando así su disposición final como residuos [46].

2.2.5.1.3 Tercera tipología. Esta tipología propone diseños ecológicos para productos de uso común, como botellas, envases y productos que suelen ser de un solo uso. Su objetivo es "reducir su uso e incorporar materiales recuperados en nuevos productos" [48].

Además del diseño de productos, esta tipología incluye también el diseño de sistemas de transporte y recolección de basuras y otra infraestructura, como parte de los modelos de ciudades sostenibles [46].

2.2.5.1.4 Cuarta tipología. Esta tipología considera la transformación de sistemas de productos a servicios, lo que implica una visión diferente de consumo y producción. Propone "el reemplazo de productos individuales por sistemas colectivos de suscripción" [48], como se puede observar en los medios de transporte público en algunas ciudades capitales del mundo, donde se ofrecen servicios de patinetas eléctricas, bicicletas compartidas, entre otros.

2.2.5.1.5 Quinta tipología. Esta tipología utiliza la tecnología como una herramienta de optimización para procesos que pueden resultar engorrosos, como la cuantificación de materiales, agua, energía y residuos generados. Además, emplea herramientas tecnológicas para medir los procesos según su importancia y su contribución a las cadenas de valor [48].

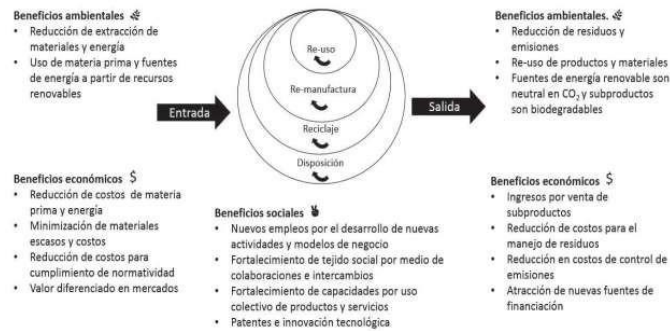
Figura 2. *Tipologías de iniciativas innovadoras de la economía circular*

Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [46].

2.2.5.2 Beneficios de la Economía Circular. En diversos países alrededor del mundo, incluyendo Colombia, se ha promovido el uso de la economía circular debido a sus beneficios a nivel social, económico y ambiental. Según la Fundación Ellen MacArthur (2013), se estima que la adopción del modelo de economía circular en sectores de mercancías de alta rotación, como alimentos en envases desechables y elementos de cuidado personal, podría generar un ahorro en costos de materiales entre 595 y 705 mil millones de dólares por año a nivel global. Además, este modelo podría impulsar el ahorro de materiales almacenados hasta en un 40% y generar empleo entre el 0,5% y el 5% del total [49].

A continuación, se muestra un esquema que ilustra los beneficios que conlleva la economía circular en cada uno de estos ámbitos.

Figura 3. *Beneficios de la Economía Circular*

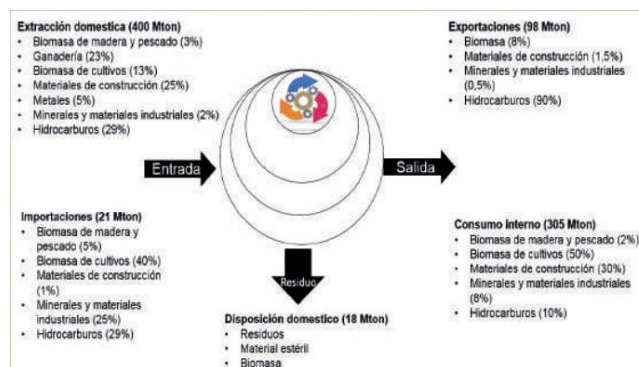


Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [50].

2.2.5.2 Diagnóstico del metabolismo de la economía colombiana. La necesidad de avanzar hacia una economía circular se fundamenta en la conservación de los recursos disponibles en el país y en la oportunidad de aprovecharlos a través de varios ciclos productivos que agreguen un mayor valor, mejorando así la productividad y creando nuevos mercados de exportación con productos diferenciados [46].

A continuación, se presenta un esquema que muestra el estado actual de la economía colombiana.

Figura 4. *Estimación del metabolismo de la economía circular*

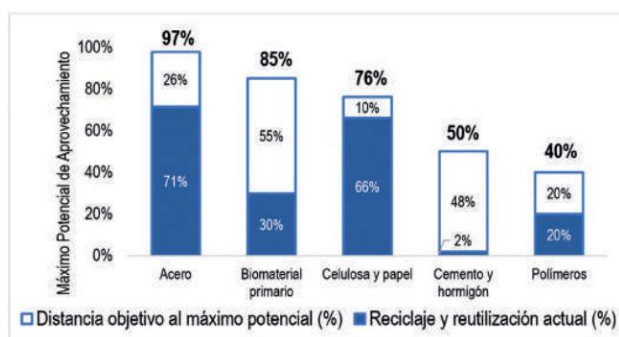


Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [51].

El balance físico entre las entradas y salidas de la economía colombiana se cierra con la estimación de los materiales que no representan valor dentro la economía, como lo son los residuos, los materiales estériles provenientes de la minería y la biomasa no aprovechada. En cuanto a los residuos domésticos, se estima que son desechados cerca de 18 millones de toneladas, que representa un 4.5% de la extracción doméstica. La disposición doméstica de residuos está compuesta por residuos orgánicos (59%), otros (16%), plásticos (13%), papel y cartón (9%), vidrios (2%) y metales (1%) [46].

Además, el gráfico siguiente compara el material disponible con el material utilizado en varios sectores, centrándose específicamente en las tasas de aprovechamiento de biomasa, cemento, mortero y polímeros. Estos sectores muestran oportunidades para aumentar su tasa de aprovechamiento.

Figura 5. *Potencial de aprovechamiento materiales utilizados en la economía colombiana*



Adaptado de Estrategia Nacional de Economía Circular [52]

2.2.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible

En 2015, todos los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como Objetivos Mundiales. Estos objetivos representan

un llamado global para la erradicación de la pobreza, la protección del planeta y el aseguramiento de la paz y la prosperidad para todos los habitantes [53].

2.2.6.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible afines con esta investigación. De los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, hay cuatro que están estrechamente vinculados con la construcción y el propósito del proyecto en desarrollo. Estos objetivos abordan la industria, la promoción de ciudades sostenibles, la toma de acciones por el clima y la promoción de una producción y consumo responsables de recursos.

2.2.6.1.1 ODS 9 Industria, innovación e infraestructura. El avance tecnológico es fundamental para encontrar soluciones duraderas a los desafíos económicos y medioambientales, incluida la generación de nuevos empleos y el aumento de la eficiencia energética. Otras formas significativas de promover el desarrollo sostenible incluyen fomentar el desarrollo industrial sostenible e invertir en investigación e innovación científica [53].

2.2.6.1.2 ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, más de la mitad de la población mundial reside actualmente en zonas urbanas. Se proyecta que para el año 2050, esta cifra aumentará a 6.500 millones de personas, lo que representa dos tercios de la población mundial. Se reconoce que no será posible lograr un desarrollo sostenible sin una transformación radical en la forma en que se lleva a cabo la construcción [53].

2.2.6.1.3 ODS 12 Producción y Consumo responsables. El logro del desarrollo sostenible se alcanzará al reducir la huella ecológica a través de una producción y consumo eficientes de recursos. Por lo tanto, es necesario modificar los métodos tradicionales con el objetivo de minimizar al máximo el impacto que generan.

La gestión eficiente de los recursos naturales compartidos y la forma en que se eliminan los desechos tóxicos y los contaminantes son vitales para lograr este objetivo. También es importante instar a las industrias, los negocios y los consumidores a reciclar y reducir los desechos, como asimismo apoyar a los países en desarrollo a avanzar hacia patrones sostenibles de consumo para 2030 [53].

2.2.6.1.4 ODS 13 Acción por el clima. Las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, y estos gases tienen efectos directos en el cambio climático, lo que puede conducir a consecuencias permanentes e irreversibles.

El objetivo busca movilizar US\$ 100.000 millones anualmente hasta 2020, con el fin de abordar las necesidades de los países en desarrollo en cuanto a adaptación al cambio climático e inversión en el desarrollo bajo en carbono [53].

2.3. Marco legal

2.3.1 Decreto 586 de 2015

En este decreto se recopilan varios artículos de la constitución política de Colombia, que incluyen disposiciones relacionadas con la protección del medio ambiente. Estas disposiciones pueden abordar temas como los siguientes:

2.3.1.1 Art. 79. Todas las personas tienen el derecho a disfrutar de un ambiente sano. La ley asegurará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es responsabilidad del Estado proteger la diversidad y la integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y promover la educación para alcanzar estos objetivos [53].

2.3.1.2 Art. 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución. También, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Asimismo, colaborará con otras naciones en la protección de los ecosistemas ubicados en zonas fronterizas [54].

2.3.2 Norma ISO 14001

Busca alcanzar un equilibrio entre el medio ambiente, la sociedad y la economía, con el fin de lograr un desarrollo sostenible. Esta norma brinda a empresas u organizaciones opciones que contribuyen a establecer un sólido sistema de Gestión Ambiental.

2.3.3 Resolución 472 del 28 de febrero de 2017

Según el ministro de Ambiente, Luis Alberto Murillo, esta norma proporciona directrices para el aprovechamiento y la disposición final de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), mediante la implementación de instrumentos y reglas para las instalaciones de gestión, como los puntos limpios y las plantas de aprovechamiento. En estos lugares se llevará a cabo la separación y el almacenamiento temporal con las condiciones mínimas de operación.

Para la realización y el análisis de los especímenes de prueba, se tienen en cuenta ciertas normas nacionales colombianas, que se describen a continuación:

2.3.4 NSR-10 Título D.

En esta sección de la Norma Sismorresistente se establecen los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de mortero. Además, se incluyen las especificaciones de los materiales utilizados en las mezclas. [73]

2.3.5 NTC 220.

La presente norma tiene por objeto establecer un método para determinar la resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico utilizando cubos de 50 mm o 50,8 mm. [59].

2.3.6 NTC 237

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad aparente frente a la densidad nominal a $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y la absorción de agua de los áridos finos. [60]

2.3.7 NTC 3937

Esta norma se aplicable a la arena normalizada que será utilizada en los ensayos de cementos hidráulicos como lo serán la realización de cubos de mortero para su ensayo a compresión. [57].

2.3.7 NTC 3356

Esta norma establece los requisitos que debe cumplir todo mortero premezclado, ya sea seco o húmedo, que se emplee en la construcción de mampostería simple o reforzada, o en otros usos estructurales. [58]

2.3.8 NTC 221

Esta norma establece el método apropiado para realizar el ensayo de determinación de la densidad del mortero [67].

2.3.8 ASTM C29

El método de ensayo de esta norma permite determinar la densidad aparente (peso unitario) de un árido tanto en su condición compactada como suelta, y calcular los huecos entre las partículas en los áridos finos, gruesos o mezclas de áridos, basada en la misma determinación. Este método se aplica a los áridos que no exceden las 5 pulgadas (125 mm) de tamaño máximo nominal [56].

2.3.9 Plan Nacional de Desarrollo 2018-2020.

Este plan establece los objetivos a alcanzar y las estrategias correspondientes, tanto para el aprovechamiento de residuos como para la optimización en el consumo de recursos naturales.

3. Metodología.

El primer paso del proyecto consiste en caracterizar los materiales que serán utilizados para la elaboración de mortero no estructural, se realizará un análisis detallado de las propiedades físicas y químicas de los materiales con los cuales se realizan mezclas de mortero.

Arena: Se determinarán la granulometría (NTC 3937), el porcentaje de absorción (NTC 237), densidad compacta y suelta (ASTM C29), Cemento: Se determinará la densidad del cemento (NTC 221) y se corroborará con las especificaciones del cemento utilizado y Agua: Se utilizarán los datos obtenidos en el artículo de C. M. Bedoya-Montoya & C. A. Medina-Restrepo basado en la NTC 3459 como guía del agua potable.

Además, se procederá con la caracterización de los residuos agroindustriales que se utilizarán en las mezclas, cáscara de huevo donde se realizará un proceso de limpieza, secado, triturado y pulverización, eliminando residuos orgánicos para evitar contaminación. Luego, se utiliza su alto contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) como adición mineral o filler. En la dosificación del mortero, se emplea un porcentaje controlado de reemplazo, generalmente entre 5% y 15% del peso del cemento y carbón de Arroz en donde se utilizará carbón de arroz calcinado a $<500^\circ\text{C}$ ya que puede funcionar plenamente como árido poroso ligero y contribuir al comportamiento físico del mortero sin comprometer la viabilidad del estudio.

Se preparará una mezcla estándar de mortero de referencia con las proporciones tradicionales de arena, cemento y agua según la NTC 220. Este mortero servirá como base para comparar los resultados obtenidos en las mezclas con los residuos agroindustriales.

Antes de la formulación se plantearán varios porcentajes de reemplazo y se realizaron mezclas con distintos porcentajes donde se contemplan algunos de los mencionados en los antecedentes. A continuación, se desarrollarán cuatro hipótesis basadas en la sustitución de porcentaje de materiales convencionales (arena y cemento) por residuos agroindustriales. La hipótesis A plantea el uso de la cascara de huevo triturada como sustituto parcial de la arena y carbón de arroz como sustituto parcial del cemento. Donde se reemplazan porcentajes desde el 5% hasta el 15% de cascara de huevo triturada, y una mezcla con un reemplazo del 5% de carbón de

arroz y 15% de cascara de huevo triturada. En la hipótesis B se plantea el uso de la cascara de huevo pulverizada como sustituto parcial del cemento y el carbón de arroz como sustituto de la arena, se realizarán reemplazos que van desde el 5% hasta el 30% de cascara de huevo pulverizado y un solo reemplazo de 1.83% de carbón de arroz. En la hipótesis C se realizará el mismo patrón de sustitución que la hipótesis A con la diferencia que se utilizara cascara de huevo pulverizada donde se realizaran reemplazos individuales de 5% hasta 15% de cascara de huevo pulverizada y de 5% y 10% de carbón de arroz. Para finalizar la hipótesis D planea reemplazos de ambos residuos en una misma mezcla manteniendo un reemplazo constante de 1.83% de carbón de arroz como sustituto parcial de la arena y reemplazos individuales de 5% hasta 25% de cascara de huevo pulverizado como sustituto parcial del cemento.

La selección de estos porcentajes se basa en investigaciones previas que indican que una sustitución moderada puede mejorar ciertas características del mortero sin afectar a su rendimiento general. Cada una de las mezclas será preparada con las proporciones especificadas en las hipótesis A, B, C y D. Las mezclas se realizarán siguiendo la misma normativa que la mezcla de referencia (NTC 220) y se dejarán en proceso de curado durante 28 días.

Las mezclas de mortero se someterán a pruebas de compresión a los 7, 14 y 28 días cada mezcla contara con 3 cubos de mortero para cada día de prueba de compresión, esto con el fin de obtener datos suficientes para poder realizar un análisis estadístico; Para analizar los datos obtenidos de las pruebas de compresión, se emplearán dos enfoques estadísticos. Análisis unifactorial para evaluar la influencia de cada uno de los factores (porcentaje de sustitución de cáscara de huevo y carbón de arroz) sobre las propiedades del mortero y análisis multifactorial para examinar las interacciones entre las variables (porcentaje de sustitución, tipo de residuo) y su efecto combinado en las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero.

Se utilizarán métodos estáticos como anova unifactorial y multifactorial además de Mann – Whitney mediante softwares que permiten este tipo de análisis (Excel y Jamovi)

Por último, los resultados obtenidos se compararán con estudios previos sobre el uso de residuos agroindustriales (cáscaras de huevo y cáscaras de arroz) en la producción de morteros no estructurales. Se revisarán las investigaciones que han utilizado estos materiales, analizando sus efectos sobre las propiedades mecánicas, la durabilidad y la sostenibilidad de los morteros. Esta comparación permitirá contextualizar los resultados obtenidos y evaluar la viabilidad de aplicar estos materiales en la construcción no estructural.

Al finalizar se realizará una viga tomando como referencia una dosificación de la hipótesis A donde se realizará un reemplazo de los dos residuos en una misma mezcla con el fin de comprobar su resistencia en un ensayo a flexión.

4. Desarrollo y resultados

4.1. Caracterización de materiales

Antes de diseñar las mezclas de mortero, se debe conocer y validar la calidad de sus componentes. A continuación, se detalla la caracterización de los materiales utilizados incluyendo los ensayos realizados y sus resultados principales, lo cual es esencial para asegurar el control de calidad y definir las proporciones de la mezcla final.

4.1.1 Granulometría

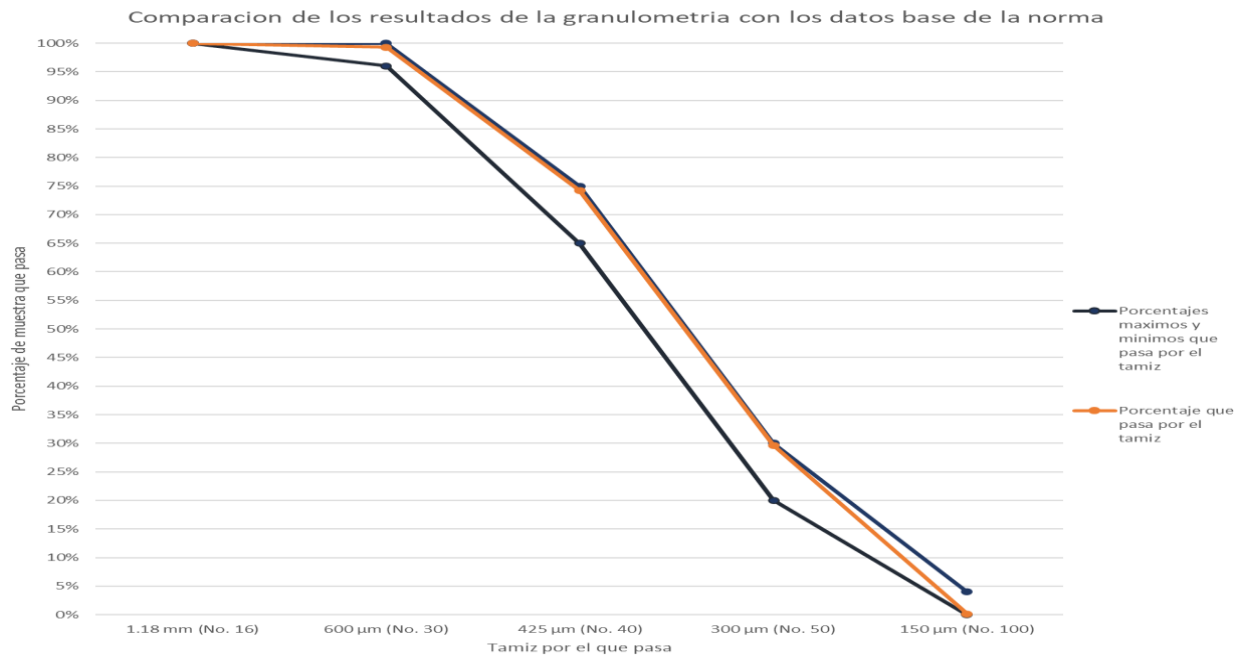
Para llevar a cabo la granulometría se siguieron las indicaciones de la NTC – 3937, el desarrollo completo de procedimiento, así como sus respectivos cálculos se encuentran presentes en el apéndice A.

4.1.1.1 Resultados. Se pudo evidenciar que los porcentajes pasantes en todos los tamices cumplen con los porcentajes establecidos en la norma (ver Tabla 4) por lo cual la muestra de arena evaluada es apta para su uso en las mezclas de mortero no estructural.

Tabla 4. Resultados granulometría.

Peso inicial (gr)		150				
TAMIZ	AVERTURA	PESO RETENIDO	% RETENIDO	%ACUMULADO	% Pasa	
16	1.18	0	0.00	0.00	100.00	Cumple
30	0.6	1.04	0.69	0.69	99.31	Cumple
40	0.425	37.63	25.09	25.78	74.22	Cumple
50	0.3	66.92	44.61	70.39	29.61	Cumple
100	0.15	44.22	29.48	99.87	0.13	Cumple
BASE		0.00	0.00	99.87	0.00	
total		149.81				

4.1.1.2 Comparación de los datos. Los datos obtenidos por la granulometría que se realizó en el laboratorio fueron comparados con los datos proporcionados por la norma NTC – 3937, estos valores representan los porcentajes máximos y mínimos que puede pasar por cada tamiz, si esto se representa en una gráfica se generan dos líneas que forman una polígono, dado que los resultados obtenidos en la granulometría están dentro del margen de porcentajes máximos y mínimos al graficarlo se verá un línea adentro del polígono previamente mencionado. (ver figura 6)

Figura 6. Comparación de los resultados de la granulometría con los datos base de la norma.

4.1.2 Densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de agregados finos

Para llevar a cabo el procedimiento experimental de la determinación de la densidad, gravedad específica y porcentaje de absorción de los agregados finos se siguió la NTC 237, el desarrollo completo de procedimiento, así como sus respectivos cálculos se encuentran presentes en el apéndice B.

4.1.2.1 Resultados. Los resultados de este experimento se obtienen mediante cálculos que demostraron que la arena tiene un porcentaje de absorción de 2.342% y una densidad específica de 1.47 g/cm³ los cuales están dentro los rangos aceptables (apéndice B, cálculos).

4.1.2.2 Comparación de los datos. La comparación de los datos obtenidos se realizó con datos de referencia de arenas ya determinadas, estos datos vienen del mismo tipo de muestra usada para este ensayo, para este caso, se utilizó una gráfica de barras que permita comparar los valores

de la densidad teórica con la densidad obtenida y la gravedad específica teórica con la gravedad específica obtenida. Para la densidad se obtuvieron valores cercanos a los valores de referencia, pero no llegaron a igualarlos, esto probablemente fue debido a la sustracción de los finos presentes en la arena (ver figura 7). Por otro lado, la gravedad específica presentó 2 resultados, el primero para la muestra seca y el segundo para la muestra superficialmente seca. para ambos resultados se obtuvieron datos de referencia para poder realizar su debida comparación, en ambos casos, los resultados estuvieron por debajo de los valores de referencia, pero esto al igual que la densidad se puede deber a la eliminación del porcentaje que paso por el tamiz No 200. (ver figura 8)

Figura 7. Comparación de los resultados de la densidad de la arena con los datos base.

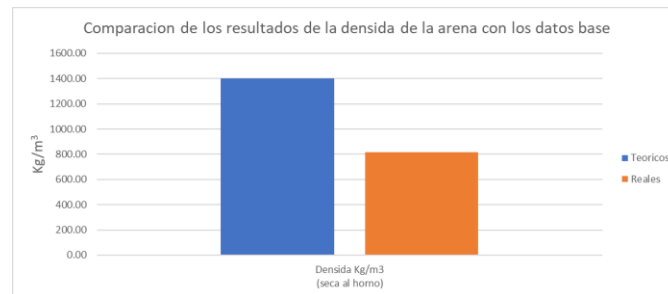
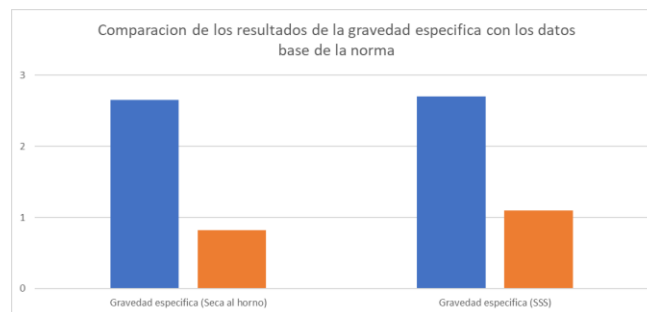


Figura 8. Comparación de los resultados de la gravedad específica con los datos base.



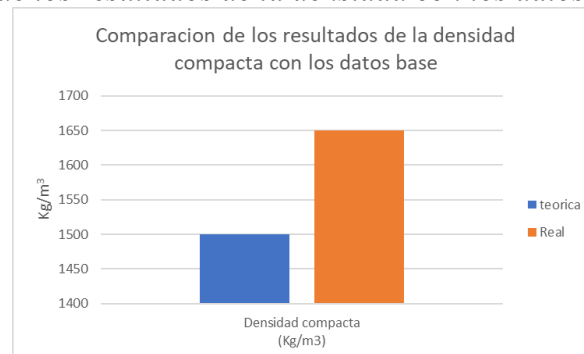
4.1.3 Densidad aparente suelta y compacta

El procedimiento experimental se hizo en base a la ASTM C29, el desarrollo completo de procedimiento, así como sus respectivos cálculos se encuentran presentes en el apéndice C.

4.1.3.1 Resultados. Los resultados obtenidos fueron que la densidad aparente suelta de la arena es de 1.46 g/cm^3 y una densidad aparente compacta de 1.65 g/cm^3 lo cual cumple con los parámetros establecidos en el laboratorio.

4.1.3.2 Comparación de los datos obtenidos. Los datos utilizados de referencia para la comparación vienen de una arena normal, en este caso los datos de referencia tienen valores menores a los obtenidos durante el ensayo esto puede ser debido a la falta de finos, el espacio ocupado por estas partículas fue usado por la arena dándole mayor masa a la muestra que el promedio. (ver figura 9)

Figura 9. Comparación de los resultados de la densidad con los datos base.



4.1.4 Densidad del cemento con el frasco de Le Chatelier

El procedimiento se realizó siguiendo la NTC 221, el desarrollo completo de procedimiento, así como sus respectivos cálculos se encuentran presentes en el apéndice D.

4.1.4.1 resultados. La densidad del cemento determinada por el experimento fue de 2.77 g/cm³ al igual que la densidad relativa es de 2.77.

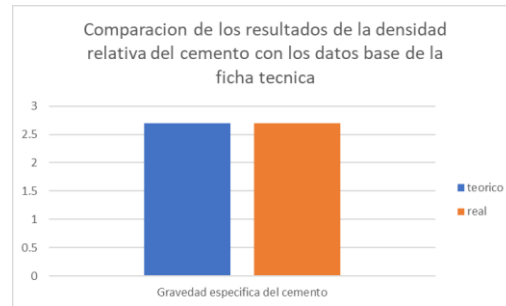
4.1.4.2 Comparación de los datos. Para la densidad del cemento si se obtuvo un dato de referencia, este se obtuvo de la ficha técnica del cemento proveniente de Cemex (ver figura 10), en este caso ambos valores de densidad dieron exactamente iguales algo que era de esperarse dado que el cemento no sufrió ningún cambio o alteración. (ver figura 11)

Figura 10. Ficha de datos de seguridad del cemento.

SECCIÓN 9 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS		
Nota: Las propiedades físicas y químicas se proporcionan únicamente para consideraciones de seguridad, salud y medio ambiente y pueden no representar por completo las especificaciones del producto. Consulte al proveedor para información adicional.		
9.1 INFORMACIÓN SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS FUNDAMENTALES		
Estado físico	Sólidos suspendidos (pasta)	Comentarios
Color	Gris o blanco	-
Olor	No tiene olor distintivo	-
Umbral de olor	No disponible	-
pH (en agua)	12 a 13	(Solución Saturada) a 25°C
Punto de fusión	No disponible	-
Punto de ebullición	>1000 °C (>1832 °F)	-
Punto de inflamabilidad	No inflamable. No combustible	-
Tiempo de combustión	No disponible	-
Velocidad de combustión	No disponible	-
Velocidad de evaporación	No disponible	-
Inflamabilidad (Sólido, gas)	No disponible	-
Límite superior e inferior explosivo (Inflamable)	No aplica	-
Presión de vapor	No aplica	-
Densidad del vapor	No aplica	-
Densidad relativa	2.7 a 3.2	-
Solubilidad	Ligeramente soluble en agua	-
Solubilidad en agua	0.1% a 1%	-
Coefficiente de partición Octanol/Agua	No aplica	-

Adaptado de ficha de datos de seguridad de Cemex Colombia. [35]

Figura 11. Comparación de los resultados de la densidad relativa del cemento con los datos base de la ficha técnica.



4.1.5 Clasificación del agua

El agua utilizada para la mezcla de mortero no estructural debía cumplir con ciertas características dictadas por la NTC 3459 dichas características son:

- Los cloruros deben estar por debajo de los 0.5 gr por cada litro de agua.
- Los sulfatos tienen un máximo de 3 gr por cada litro de agua.
- Los álcalis no pueden superar 1 gr por cada litro de agua.
- Los sólidos suspendidos no deben exceder los 50 gr por litro de agua.

Para llevar a cabo las mezclas de mortero se usó agua potable que cumple con creces con las especificaciones dadas por la normativa por lo que su uso es completamente acertado.

4.2 Ensayos de resistencia

4.2.1 Determinación de la resistencia de cubos de mortero

El procedimiento para la determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulicos siguió lo dictado por la NTC 220 de lo que fue la dosificación de referencia con la cual se va a llevar a cabo una comparación con las dosificaciones óptimas, este procedimiento se evidencia en el apéndice E.

4.2.1.1 Resultados de las fallas de los cubos de mortero no estructural. Los resultados obtenidos por los cubos de mortero de referencia fueron los esperados para un cubo de mortero no estructural (ver tabla 5).

Tabla 5. Resistencias de los cubos de mortero tipo no estructural sin ninguna sustitución.

Muestras Base	7 días		Muestras base	14 días		Muestras base	28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]		Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]		Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
Cubo #1	2101	14.66	Cubo #1	2157.6	18.78	Cubo #1	2192.8	21.37
Cubo #2	2100	11.64	Cubo #2	2135.2	17.1	Cubo #2	2185.6	20.44
Cubo #3	2095.6	10.95	Cubo #3	2128.3	16.57	Cubo #3	2184.1	20.15

4.2.2 Determinación de la resistencia de cubos de mortero alterados

4.2.2.1 Preparación de los cubos de mortero alterados. Los primeros cubos de mortero alterados se hicieron variando un 5% en las cantidades de sustitución utilizada en la mezcla para ver hasta qué porcentaje es óptimo el uso de la cascara de huevo o el carbón de cascarilla de arroz (ver tabla 6) esto se ve más detallado en el **apéndice F**.

Tabla 6. Dosificaciones de las mezclas.

Muestra	A/C	A/C (gr)	%C_Arroz	C_Arroz (gr)	%C_Huevo	C_Huevo (gr)
1	0.485	105.82	5%	10.91	5%	30.00
2	0.485	105.82	15%	32.73	5%	30.00
3	0.485	105.82	15%	32.73	15%	90.00
4	0.485	105.82	10%	21.82	10%	60.00
5	0.485	105.82	2.93%	6.39	10%	60.00
6	0.485	105.82	17.07%	37.25	10%	60.00
7	0.485	105.82	10%	21.82	2.93%	17.57
8	0.485	105.82	10%	21.82	17.07%	102.43
9	0.485	105.82	0%	0.00	5.00%	30.00
10	0.485	105.82	0%	0.00	10.00%	60.00
11	0.485	105.82	0%	0.00	15.00%	90.00

12	0.485	105.82	0%	0.00	20.00%	120.00
13	0.485	105.82	5%	10.91	0.00%	0.00
14	0.485	105.82	10%	21.82	0.00%	0.00
15	0.485	105.82	5%	10.91	15.00%	90.00

4.2.2.2 Resultados de los cubos de mortero alterados. Los resultados evidenciaron un comportamiento heterogéneo entre las dosificaciones, con algunas mezclas alcanzando resistencias cercanas a las de referencia, mientras que otras no lograron soportar siquiera la precarga de la máquina, impidiendo registrar su valor. Cada dosificación se elaboró en series de tres cubos y se evaluó a los 7, 14 y 28 días de curado, lo que permitió identificar cuáles mezclas conservaron adecuadamente sus propiedades físico-mecánicas y descartar aquellas que no cumplieron con los criterios establecidos. (ver Tabla 7).

Tabla 7. *Resultados de los cubos de mortero alterados.*

Muestra	Esfuerzo (MPa) 7 Días	Esfuerzo (MPa) 14 Días	Esfuerzo (MPa) 28 Días
1	6.56	11.43	10.07
2	N/A	N/A	N/A
3	N/A	N/A	N/A
4	6.42	7.36	8.32
5	7.33	8.23	9.06
6	N/A	N/A	N/A
7	6.51	6.3	11.4
8	4.08	N/A	N/A
9	12.72	18.3	17.26
10	10.37	13.09	16.75
11	9.62	13.08	12.96
12	13.66	16.42	17.24
13	6.54	12.07	12.56
14	7.54	7.22	14.73
15	4.23	5.3	7.18

4.2.3 Replicación de las dosificaciones con mejores resultados en forma de hipótesis

Para poder hacer un análisis estadístico de los resultados obtenidos se extrajeron los más cercanos a los datos de referencia y se replicaron en 4 hipótesis clasificados en A, B, C y D procedimiento experimental para la replicación de los resultados anteriores, el desarrollo completo de procedimiento, así como sus planteamientos, dosificaciones y cálculos se encuentran presentes en el apéndice G.

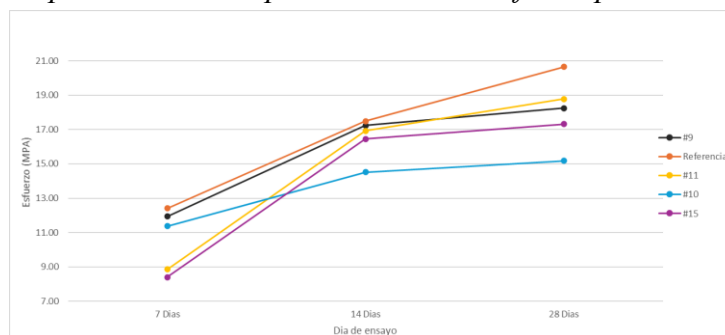
4.2.3.1 Resultados de la hipótesis A. Después de pasados 28 días de curado, se obtuvieron los resultados de la resistencia a compresión de todos los cubos de la hipótesis A los cuales fueron registrados junto con los datos de los cubos sin ninguna sustitución (ver tabla 8), esto con el fin de comparar visualmente los resultados obtenidos por la hipótesis A con los de referencia de la NTC – 220.[1]

Tabla 8. Resultados hipótesis A.

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
Obtenidas de la NTC-220	2101	14.66	2157.6	18.78	2192.8	21.37
	2100	11.64	2135.2	17.1	2185.6	20.44
	2095.6	10.95	2128.3	16.57	2184.1	20.15
#9	2096.8	10.37	2092.8	16.03	2069.1	16.75
	2099.3	12.35	2115.6	17.15	2096.4	17.74
	2100.1	13.09	2131.6	18.53	2165.6	20.25
#10	2085.6	9.62	2169.6	13.93	2102.2	15.05
	2091.2	12.96	2086.5	15.28	2118.4	15.38
	2088.9	11.54	2143.8	14.35	2147.2	15.09
#11	2120	8.24	2082.9	16.42	2151.7	18.02
	2195.2	9.73	2147.9	17.24	2145.7	19.45
	2139.6	8.62	2138.4	17.12	2148.2	18.86
#15	2045.5	8.41	2090.9	16.58	2133.5	17.26
	2061.9	8.35	2135.5	15.53	2131.2	16.38
	2032	8.46	2130.1	17.26	2136	18.3

El análisis de los resultados de la hipótesis A evidencia que las resistencias a compresión obtenidas se aproximan a las de la mezcla de referencia, con variaciones que reflejan tendencias vinculadas a la dosificación. La muestra #11 destacó por su desempeño estable, alcanzando valores superiores a 18 MPa a los 28 días, lo que sugiere una adecuada compactación y equilibrio en la composición. En contraste, la muestra #10 registró las resistencias más bajas (15.05–15.38 MPa), posiblemente asociadas a mayor porosidad y menor densificación de la mezcla. Si bien estas diferencias permiten una primera aproximación al comportamiento mecánico, será el análisis estadístico posterior el que determine la significancia de dichas variaciones y defina qué dosificación presenta un desempeño comparable o superior a la mezcla tradicional. (ver figura 12).

Figura 12. Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis A.



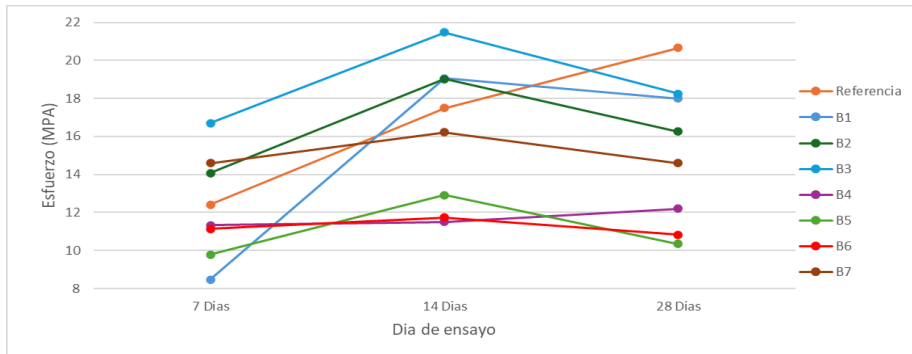
4.2.3.2 Resultados de la hipótesis B. Para la hipótesis B, se registraron los resultados a 28 días de curado junto con los valores de referencia de la NTC-220 [1], con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de las dosificaciones con sustitución (ver tabla 9).

Tabla 9. Resultados de la hipótesis B

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
Obtenidas de la	2101	14.66	2157.6	18.78	2192.8	21.37
	2100	11.64	2135.2	17.1	2185.6	20.44

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
NTC-220	2095.6	10.95	2128.3	16.57	2184.1	20.15
#1	2032.8	7.65	2098.4	19.33	2105.6	18.42
	1933.6	9.31	2088	18.8	2096	17.56
	1983.2	8.48	2093.2	19.06	2100.8	17.99
#2	2168	14.8	2115.2	19.46	1996.3	16.75
	2114.4	13.34	2057.6	18.56	1976.1	15.78
	2141.2	14.07	2086.4	19.01	1985.8	16.26
#3	2092.8	16.34	2380	22.4	2129.6	17.53
	2128	17.05	2132.8	20.56	2075.2	18.95
	2110.4	16.69	2256.4	21.48	2102.4	18.24
#4	2054.4	11.84	2077.6	10.89	2049.6	12.14
	2048	10.82	2070.4	12.13	2060.8	13.07
	2051.2	11.33	2074	11.51	2057.6	11.36
#5	2010.4	6.96	1989.6	12.19	2114.4	9.29
	2088	12.6	2086.4	13.66	2064.8	11.65
	2049.2	9.78	2038	12.92	2052.3	10.1
#6	2121.6	10.52	2061.6	11.46	2081.6	11.76
	2128	11.75	2061.6	12.01	2084.8	9.81
	2124.8	11.13	2063.5	11.73	2083.2	10.9
#7	2013.6	12.28	2061.6	16.07	2072.6	13.13
	2077.6	16.93	2064	16.35	2088.1	16.28
	2045.6	14.6	2062.8	16.21	2068	14.4

El análisis de la hipótesis B evidencia comportamientos contrastantes según la dosificación. La muestra B3 alcanzó resistencias a compresión superiores a las de referencia en edades tempranas, con 22.4 MPa a los 14 días frente a 18.78 MPa de la mezcla base, manteniéndose competitiva al día 28. En cambio, las muestras B5 y B6 registraron valores significativamente menores (9.29–11.65 MPa), lo que sugiere deficiencias en la interacción entre el sustituyente y la matriz cementante, generando mayor porosidad y pérdida de capacidad resistente. La muestra B4, con valores de 11.36–13.07 MPa al día 28, mostró un crecimiento limitado de resistencia. Estos resultados reflejan que la efectividad de las sustituciones depende en gran medida de la dosificación y la combinación de materiales, aspecto que será confirmado mediante el análisis estadístico posterior. (ver figura 13)

Figura 13. *Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis B.*

4.2.3.3 Resultados de la hipótesis C. Transcurridos los 28 días de curado, se determinaron los valores de resistencia a la compresión de los especímenes correspondientes a la hipótesis C, los cuales se compararon con las muestras de referencia de la NTC 220 [1] para evaluar su comportamiento (ver tabla 10).

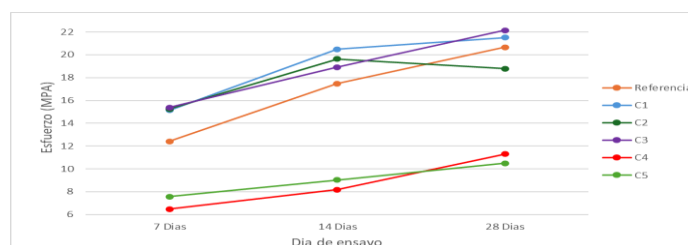
Tabla 10. *Resultados de la hipótesis C*

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
Obtenidas de la NTC-220	2101	14.66	2157.6	18.78	2192.8	21.37
	2100	11.64	2135.2	17.1	2185.6	20.44
	2095.6	10.95	2128.3	16.57	2184.1	20.15
#1	2116	15.4	2112	21.12	2144.8	21.47
	2116.8	14.86	2132.8	19.86	2137.6	21.58
	2116.4	15.13	2122.4	20.49	2130.4	21.5
#2	2088	16.1	2111.2	20.14	2116	18.87
	2104	14.39	2108.8	19.13	2123.2	18.68
	2096	15.24	2110	19.63	2073.6	18.79
#3	2121.6	15.58	2114.4	19.87	2138.4	22.8
	2109.6	15.18	2116	17.94	2133.6	21.47
	2115.6	15.38	2115.2	18.9	2067.2	22.15
#4	2022.4	6.35	2032	8.52	2029.6	12.32
	2009.6	6.6	2034.4	7.82	2039.2	10.28
	2016	6.47	2033.2	8.17	2030.6	11.28
#5	1984.8	8.03	1988	10.05	1996.2	11.49
	1992	7.11	1992	7.99	2006.4	9.49

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
	1988.4	7.57	1990	9.02	1986.3	10.51

El análisis de la hipótesis C revela dos tendencias contrastantes según la dosificación. Las muestras C1, C2 y C3 alcanzaron resistencias comparables e incluso superiores a las de referencia, destacándose C3 con 22.8 MPa al día 28, lo que sugiere una interacción favorable del mortero con la cascara de huevo pulverizada y una posible mejora en la densificación de la matriz. En cambio, las muestras C4 y C5 registraron valores entre 10.28 y 12.32 MPa, evidenciando un desempeño claramente inferior que podría atribuirse a una dosificación inadecuada y a la generación de una microestructura más porosa y menos cohesionada. (ver figura 14)

Figura 14. Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis C.

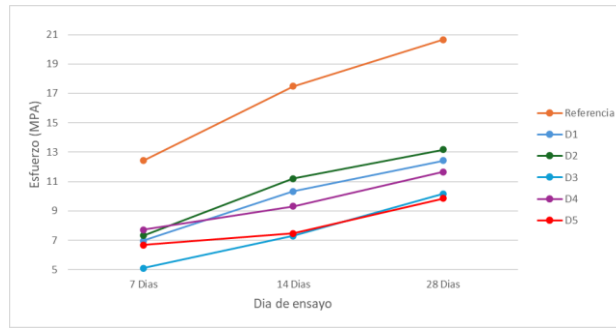


4.2.3.4 Resultados de la hipótesis D. Finalizados los 28 días de curado, se registraron las resistencias a la compresión de los especímenes correspondientes a la hipótesis D, las cuales se compararon con las mezclas convencionales y con las muestras de referencia de la NTC 220 [1] (ver tabla 11).

Tabla 11. Resultados de la hipótesis D.

Muestras	7 días		14 días		28 días	
	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]	Densidades [Kg/m ³]	Esfuerzo [Mpa]
Obtenidas de la NTC-220	2101	14.66	2157.6	18.78	2192.8	21.37
	2100	11.64	2135.2	17.1	2185.6	20.44
	2095.6	10.95	2128.3	16.57	2184.1	20.15
#1	2023.2	6.48	2032	10.05	2036.8	12.3
	2010.4	7.43	2044.8	10.71	2037.6	12.7
	2016.8	6.98	2038.4	10.26	3037.2	12.28
#2	2020	7.6	2034.4	11.39	2024	11.9
	2010.4	7.05	2044.8	11.03	2044.8	14.45
	2015.2	7.29	2039.6	11.21	2034.4	13.19
#3	1946.4	4.63	1945.6	6.09	2075.9	10.21
	1944	5.66	1944.9	8.66	2076.2	10.15
	1945.2	5.01	1945.2	7.13	2076	10.16
#4	2021.6	7.49	2040.4	9.36	2059.2	11.47
	2077.6	7.96	2074.4	9.31	2071.2	11.87
	2049.6	7.68	2049.6	9.29	2065.2	11.61
#5	2069.6	7.7	2063.2	8.69	2056.8	9.37
	2028	5.8	2046.4	6.41	2064.8	10.34
	2048.8	6.55	20488	7.31	2060.8	9.84

El análisis de la hipótesis D muestra que todas las mezclas presentaron resistencias a compresión notablemente inferiores a las de referencia, con valores entre 9.37 y 14.45 MPa frente a 20.15–21.37 MPa. Esta reducción se asocia a una alteración en la microestructura del mortero, probablemente por aumento de porosidad y menor formación de productos de hidratación, lo cual también se refleja en densidades más bajas. Incluso la muestra D#2, con el mejor desempeño relativo, apenas superó los 14 MPa, evidenciando que ninguna formulación alcanzó los estándares de referencia. En consecuencia, la dosificación y el nivel de sustitución empleados resultan inadecuados para aplicaciones estructurales, siendo necesario replantear la composición o ajustar el porcentaje de sustitución. (ver figura 15).

Figura 15. Grafica comparativa con los promedios de las 3 fallas por día de la hipótesis D.

5. Análisis estadístico de resultados de las hipótesis

5.1 Análisis de dispersión de las hipótesis

El análisis estadístico aplicado permite evaluar la variabilidad de los resultados dentro de un mismo grupo mediante indicadores de tendencia central (promedio y mediana) y de dispersión (rango, varianza, desviación estándar y porcentaje de desviación). Estas medidas facilitan la identificación del grado de consistencia de los datos, determinando si los valores se encuentran concentrados o dispersos. Con ello es posible estimar la estabilidad del conjunto, la precisión de las mediciones y la confiabilidad de las conclusiones derivadas, así como su posible replicabilidad en condiciones similares.

5.1.1 Análisis de dispersión de la hipótesis A

El primer análisis aplicado a la hipótesis A fue el de varianza, con el fin de identificar la dosificación con mayor resistencia promedio. La muestra #11 (15% de sustitución con cáscara de huevo) presentó el mejor desempeño con 18.78 MPa a los 28 días, seguida de la muestra #9 (5% de sustitución) con 18.25 MPa. En contraste, la muestra #10 (10% de sustitución) registró la menor resistencia, con 15.17 MPa. Este comportamiento evidencia que la cáscara de huevo es un sustituto

viabile del agregado fino, siempre que se emplee en proporciones adecuadas. Adicionalmente, el análisis de varianza y desviación estándar mostró valores bajos, cercanos a cero en varios casos, lo que confirma la precisión de los resultados. Destaca la muestra #15, con 17.31 MPa a los 28 días y una varianza mínima de 0.003 MPa a los 7 días, lo que sugiere homogeneidad en la mezcla. En conjunto, los resultados validan la confiabilidad de las dosificaciones óptimas, indicando que estas podrían ser replicadas con desempeños similares en futuras aplicaciones, para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice H.

5.1.2 Análisis de dispersión hipótesis B

En la hipótesis B, el análisis de varianza y el cálculo de promedios mostraron que la dosificación con 15% de sustitución de agregado fino por cáscara de huevo (muestra #3) alcanzó la mayor resistencia promedio, mientras que la de 25% (muestra #5) registró los valores más bajos. Los resultados indican que a partir del 20% de sustitución (muestra #4) la resistencia comienza a disminuir significativamente. Asimismo, la varianza y el porcentaje de desviación fueron muy bajos, lo que confirma la precisión y confiabilidad de los ensayos realizados, para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice H.

5.1.3 Análisis de dispersión hipótesis C

El análisis de dispersión de la hipótesis C evidenció resultados favorables, destacándose la muestra #3 (15% de sustitución con cáscara de huevo pulverizada) con la mayor resistencia promedio, mientras que la muestra #5 (10% de sustitución con cascarilla de arroz) obtuvo el menor desempeño. Se resalta que las sustituciones con cáscara de huevo alcanzaron valores de resistencia superiores frente a otras combinaciones. Además, la varianza y el porcentaje de desviación fueron

bajos o cercanos a cero, lo que confirma la precisión de los ensayos, para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice H.

5.1.4 Análisis de dispersión de la hipótesis D

El análisis de dispersión de la última dosificación mostró resistencias promedio muy bajas en todas las mezclas. La muestra #2, con 1.83% de sustitución de arena por cascarilla de arroz y 10% de sustitución de agregado fino por cáscara de huevo, alcanzó el mayor valor, aunque aún insuficiente. En contraste, la muestra #5, con 1.83% de sustitución de arena por cascarilla de arroz y 25% de sustitución con cáscara de huevo, registró la menor resistencia. En cuanto a la precisión, la mayoría de los resultados presentaron varianzas y porcentajes de dispersión bajos, confirmando su confiabilidad; sin embargo, las muestras #3 y #5 evidenciaron valores elevados de dispersión, lo que podría afectar la replicabilidad de los ensayos y generar resultados menos consistentes, para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice H.

5.2 Anovas de resultados de las hipótesis

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística empleada para identificar si existen diferencias significativas entre los promedios de varios grupos. En este estudio se utilizó para comparar los resultados de resistencia de las distintas dosificaciones en cada edad de ensayo, con el fin de establecer si las variaciones responden al tipo de sustitución o a fluctuaciones aleatorias. Cada ANOVA se aplicó únicamente entre dosificaciones con el mismo material sustituto (cáscara de huevo, cascarilla de arroz o combinación), y en una sección posterior se integra un análisis global para observar tendencias generales.

5.2.1 Anova de resultados de la hipótesis A

A los 7 días, la resistencia de los cubos disminuyó con el aumento del porcentaje de sustitución, registrando 11.94 MPa en el 5% y 8.86 MPa en el 15%, siendo el primero el de mayor desempeño. El análisis ANOVA arrojó un coeficiente de probabilidad de 0.065, mayor a 0.05, lo que indica que no existen diferencias estadísticas significativas entre los resultados; esto se explica por la similitud entre los promedios del 5% y 10%, a pesar de la diferencia con el 15%.

Al día 14, ambas dosificaciones incrementaron su resistencia, pero con menor precisión, evidenciada en el coeficiente de probabilidad de 0.02 (<0.05), que confirma diferencias estadísticas entre los resultados, aunque estos permanecen cercanos.

Finalmente, al día 28 todas las muestras alcanzaron su resistencia máxima, destacándose la dosificación con 15% de sustitución, que superó a las demás con 18.78 MPa, lo que demuestra que porcentajes más altos de reemplazo pueden ser viables siempre que se mantengan en rangos adecuados.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice I.

5.2.2 Anova de resultados de la hipótesis B

En el primer día de ensayo de la hipótesis B se observaron resultados heterogéneos, destacándose la muestra B3 (15% de sustitución del material cementante por cáscara de huevo procesada) con 16.69 MPa, lo que sugiere un efecto acelerante en el desarrollo inicial de resistencia. A partir de la muestra B4 (9.78 MPa) y en porcentajes superiores al 25% de sustitución, la resistencia disminuyó de forma considerable.

En el segundo día de ensayo, la tendencia se mantuvo con variabilidad en los resultados, aunque nuevamente la muestra B3 alcanzó la mayor resistencia con 21.48 MPa, seguida de cerca por las dosificaciones del 5% y 10%.

En el día 28 ocurrió un comportamiento atípico, ya que todas las mezclas redujeron su resistencia respecto al día 14. La única excepción fue la muestra B3, que, aunque descendió respecto al segundo ensayo, mantuvo un valor aceptable de 18.24 MPa.

Cabe señalar que no se consideró el coeficiente de probabilidad, dado que las diferencias entre las dosificaciones fueron notoriamente amplias y los valores tienden a cero, confirmando su falta de similitud estadística.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice I.

5.2.3 Anova de resultados de la hipótesis C

Esta hipótesis integra dos tipos de sustitución: las tres primeras dosificaciones corresponden a cáscara de huevo y las dos últimas a cascarilla de arroz.

En el día 7 de curado, las resistencias fueron elevadas pese al corto tiempo, destacando la dosificación con 15% de sustitución por cáscara de huevo con 15.38 MPa. Además, los resultados fueron estadísticamente similares, como lo confirma un coeficiente de probabilidad de 0.84. En el día 14, las resistencias se mantuvieron altas, evidenciando que la cáscara de huevo pulverizada actúa como acelerante. La muestra con 5% de sustitución alcanzó el mayor valor (20.49 MPa), superando incluso al 15%. El coeficiente de probabilidad fue de 0.094, confirmando similitud estadística. En el día 28, los resultados siguieron siendo positivos, aunque con mayor dispersión. La mezcla con 15% de sustitución de cáscara de huevo triturada obtuvo la mayor resistencia (22.14

MPa). Sin embargo, el coeficiente de probabilidad fue muy bajo (tendiendo a 0), lo que indica diferencias estadísticas entre las muestras.

En contraste, las dosificaciones con cascarilla de arroz caolinizada mostraron resistencias bajas desde el inicio. En el día 7, la mayor fue de 7.57 MPa con 10% de sustitución. En el día 14, hubo un leve aumento, alcanzando 9.02 MPa en la misma dosificación. Finalmente, en el día 28, la resistencia máxima registrada fue de apenas 11.29 MPa con 5% de sustitución.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice I.

5.2.4 Anova de resultados de la hipótesis D

La última hipótesis combina ambas sustituciones: la cascarilla de arroz reemplaza al material cementante y la cáscara de huevo pulverizada sustituye al agregado fino. En el día 7, los resultados mostraron resistencias bajas y variables, destacando la muestra D3 con apenas 5.10 MPa y la máxima resistencia en la dosificación con 20% de sustitución (7.71 MPa), lo que sugiere que la combinación de ambos materiales no resulta favorable, a diferencia de los buenos resultados observados previamente con solo cáscara de huevo.

Al día 14, la resistencia aumentó levemente, alcanzando su valor máximo en la dosificación con 10% de sustitución (11.21 MPa). Sin embargo, el incremento fue reducido, anticipando resultados limitados en la prueba final.

En el día 28, los valores se mantuvieron similares a los del segundo ensayo, e incluso algunas muestras, como la C5 con 25% de sustitución, presentaron una disminución de resistencia (7.27 MPa). La dosificación más resistente volvió a ser la del 10% de sustitución, con 11.21 MPa.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice I.

5.3 Método Mann-Whitney para los resultados de las hipótesis

El método de Mann-Whitney es una prueba estadística no paramétrica utilizada para comparar dos grupos independientes, sin requerir distribución normal en los datos. En este proyecto se aplicó para contrastar los resultados de resistencia de las diferentes dosificaciones con los valores de referencia, a fin de determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas o atribuibles al azar. A diferencia del ANOVA, este método permite evaluar directamente cada dosificación frente al estándar, sin necesidad de agruparlas por categoría específica, lo que lo hace especialmente útil para analizar combinaciones diversas de sustituciones.

5.3.1 Mann – Whitney de la hipótesis A

En el día 7, las muestras #1 (5% de sustitución) y #2 (10%) fueron las más cercanas a los valores de referencia, mientras que la #3 (15%) mostró un mayor alejamiento. La comparación estadística mediante los cálculos de U1 (datos base) y U2 (resistencias obtenidas) determinó que el valor mínimo de U fue 7 frente a un rango “ α ” de 2, lo que confirma que no existieron diferencias estadísticas significativas, validando la exactitud de esta primera prueba.

Para el día 14, la muestra #3 mejoró notablemente, alcanzando valores similares a los de referencia, mientras que la #1 se mantuvo como la más cercana y la #2 pasó a ser la más alejada. En este caso, el valor de U fue 8 frente a un rango de 2, lo que indica nuevamente ausencia de diferencias significativas.

En el día 28, la muestra #3 (15%) resultó la más cercana a los valores de referencia, superando incluso a la muestra #1 (5%), mientras que la #2 (10%) se mantuvo con resistencias positivas, pero menos aproximadas. Esta disminución redujo la exactitud general de la hipótesis, ya que el valor de U fue 1 frente a un rango de 2, lo que evidencia diferencias significativas.

La hipótesis A incluyó una cuarta dosificación con sustituciones combinadas. En el día 7, los resultados se acercaron a los valores de referencia, aunque no lograron alcanzarlos. Tanto el rango como el valor de U fueron 0, lo que indica diferencias significativas y baja exactitud.

Al día 14, las resistencias mejoraron hasta igualar o superar en algunos casos los valores de referencia; el rango fue 0 y $U = 3$, lo que confirma ausencia de diferencias estadísticas y resultados exactos en esta etapa.

Finalmente, en el día 28, aunque se observó un incremento en la resistencia, este no fue suficiente para alcanzar los valores de referencia. La prueba estadística arrojó nuevamente rango = 0 y $U = 0$, indicando diferencias significativas y pérdida de exactitud.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice J.

5.3.2 Mann – Whitney de la hipótesis B

En el primer día de ensayo se identificaron tres comportamientos: la dosificación con 5% de sustitución de cáscara de huevo no alcanzó la resistencia esperada, la de 20% igualó los valores de referencia y la de 15% los superó. La exactitud estadística fue alta, con un rango de 7 y un valor de U de 24, lo que indica similitud con los datos de referencia.

En el segundo día, las dosificaciones con mayores porcentajes de sustitución quedaron por debajo de los valores de referencia, mientras que las de 15% o menores los igualaron o superaron. La hipótesis mantuvo su exactitud, confirmada con un rango de 7 y un valor de U de 26.

Al día 28 todas las dosificaciones perdieron resistencia, siendo más afectadas las de mayor porcentaje de sustitución. Esto generó diferencias estadísticas, con un rango de 7 y un valor de U de 0.

Respecto a las dosificaciones con cascarilla de arroz caolinizada como sustituto del agregado fino, los resultados del día 7 superaron los valores de referencia, mostrando buena exactitud. Sin embargo, al día 14 la resistencia estuvo cerca, pero no igualó los valores de referencia, registrando rango y U de 0. Finalmente, al día 28 la resistencia disminuyó aún más, confirmando la baja exactitud de esta hipótesis con rango y U de 0.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice J.

5.3.3 Mann – Whitney de la hipótesis C

La hipótesis C contempla dos tipos de dosificación: una con sustitución del agregado fino por cáscara de huevo pulverizada y otra con sustitución del material cementante por cascarilla de arroz caolinizada.

En el primer grupo (cáscara de huevo), las resistencias obtenidas superaron ampliamente los valores de referencia, lo que determinó diferencias estadísticas significativas. En el día 7, los valores de rango y U fueron 2 y 1 respectivamente, indicando baja exactitud pese a resistencias superiores. Al día 14, las resistencias continuaron por encima de los datos de referencia, aunque con poca exactitud estadística (rango = 2; U = 1). (ver apéndice J, tabla 71). Finalmente, en el día 28, el incremento de resistencia fue mínimo, pero suficiente para igualar los datos de referencia. Los valores de rango = 2 y U = 9 confirmaron la alta exactitud y destacaron a la hipótesis C como una de las más consistentes en comportamiento físico-mecánico.

En el segundo grupo (cascarilla de arroz como sustituto cementante), los resultados fueron desfavorables. En el día 7, las resistencias estuvieron muy por debajo de lo esperado, llegando en la dosificación con 5% a menos de la mitad del valor de referencia. El análisis confirmó diferencias negativas (rango = 1; U = 0). Al día 14, aunque hubo un ligero incremento, los valores

permanecieron muy bajos e insuficientes para alcanzar los de referencia, manteniendo diferencias estadísticas significativas. En el día 28, las resistencias se mantuvieron en niveles bajos y con exactitud deficiente (rango y U nuevamente desfavorables), lo que demuestra que esta sustitución no es viable para garantizar un mortero con resistencia óptima.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice J.

5.3.4 Mann – Whitney de la hipótesis D

La última hipótesis incluye un solo tipo de dosificación en el que se reemplazan tanto el agregado fino como el material cementante por cascarilla de arroz caolinizada y cáscara de huevo pulverizada.

En el primer día de ensayo, los resultados fueron notablemente bajos frente a los datos de referencia, destacando la mezcla con 15% de sustitución de cáscaras de huevo y 1.83% de cascarilla de arroz, que presentó la resistencia más baja. Esto se reflejó en la exactitud de la hipótesis, con un rango de 4 y un coeficiente U de 0.

En la segunda prueba, la resistencia mejoró de forma mínima, ampliando aún más la diferencia con los datos de referencia, especialmente en las mezclas con mayores porcentajes de sustitución, lo que anticipaba un resultado desfavorable en la tercera prueba.

Finalmente, ninguna de las dosificaciones logró acercarse o superar las resistencias de referencia, confirmando una exactitud muy baja, con un rango de 5 y un coeficiente U de 0.

Para ver las tablas y los cálculos realizados para obtener estos análisis ver apéndice J.

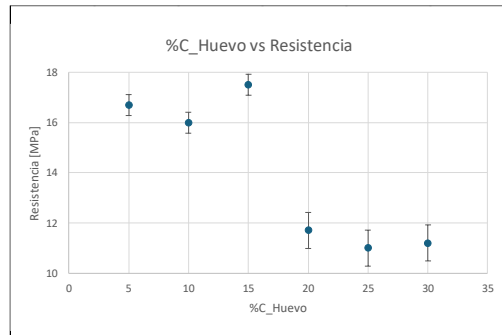
5.4 Anova multivariable de las hipótesis

La ANOVA multivariable, a diferencia de la unifactorial, permite analizar simultáneamente varias variables y evaluar la varianza entre diferentes grupos, lo que la hace más robusta cuando intervienen múltiples factores. En este estudio se aplicó para comparar las resistencias de todas las dosificaciones de una misma sustitución (por ejemplo, cáscara de huevo), con el fin de identificar diferencias significativas y determinar cuál presenta el mejor desempeño mecánico. Posteriormente, se realizará el mismo análisis con las dosificaciones de cascarilla de arroz. Este método entrega valores como F y p-valor, que permiten establecer si las diferencias observadas son estadísticamente relevantes y qué dosificación resulta superior o inferior dentro de cada grupo.

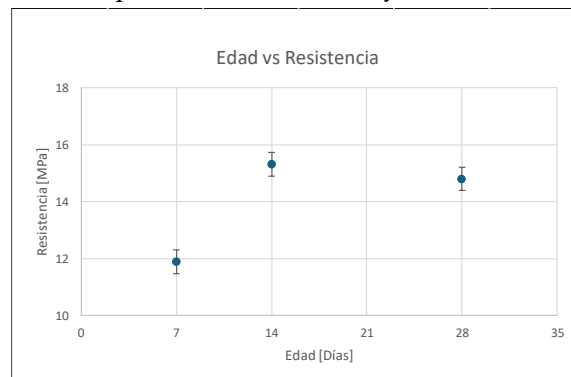
5.4.1 Anova multivariable de las hipótesis que solo sustituyen con cascaras de huevo

El análisis ANOVA mostró que sustituir hasta un 15 % de la cáscara de huevo mejora la resistencia a la compresión de los cubos de mortero. La prueba post hoc de Tukey reveló diferencias significativas entre los grupos con sustitución baja (5 % - 15 %) y alta (20 % - 30 %), lo que pone de relieve que los aumentos de resistencia solo son apreciables en los primeros porcentajes de sustitución, mientras que los porcentajes más altos no generan mejoras adicionales. Esto sugiere un efecto techo más allá de un determinado porcentaje, más allá del cual no se observan beneficios y, de hecho, las mejoras disminuyen. (véase el apéndice K, cuadro 79).

El gráfico (véase la figura 16) y la tabla 80 (véase el apéndice K) muestran que la resistencia media más alta (17,5 MPa) se alcanzó con una sustitución del 15 %, mientras que porcentajes más altos provocaron una disminución significativa de la resistencia media. Las diferencias observadas son estadísticamente significativas según las pruebas post hoc.

Figura 16. Resistencias promedio por cada porcentaje de cascaras de huevo.

Se observa que la resistencia promedio del concreto con cascara de huevo aumenta significativamente de los 7 a los 14 días de curado de 11.9 MPa a 15.3 MPa (ver apéndice K, tabla 81); sin embargo, al pasar a 28 días, la resistencia promedio no incrementa significativamente, manteniéndose en 14.8 MPa. Esto sugiere que la mayor ganancia de resistencia ocurre en los primeros 14 días, estabilizándose la resistencia posteriormente, lo cual es típico en mezclas de concreto. En la gráfica se puede evidenciar dicha estabilización cuando llega al día 14 de curado y los valores promedio llegan incluso a juntarse con los valores del día 28. (ver figura 17)

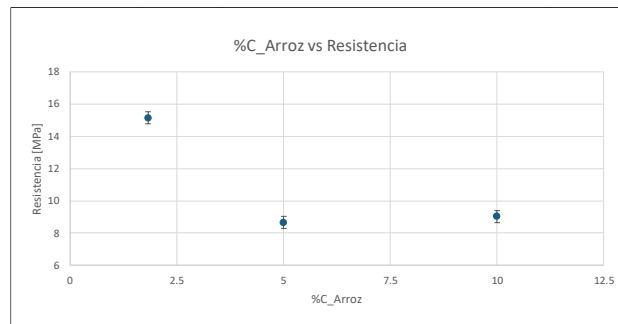
Figura 17. Resistencias promedio por cada día de ensayo de cascaras de huevo.

5.4.2 Anova multivariable de sustituciones de solo cascarillas de arroz

El análisis ANOVA mostró que tanto el porcentaje de sustitución de la cáscara de arroz como el tiempo de curado afectan significativamente a la resistencia a la compresión de los cubos de mortero. Además, se encontró una interacción significativa entre ambos factores, lo que indica que el impacto del porcentaje de sustitución varía en función del tiempo de curado (véase el apéndice K, tabla 13).

Las pruebas post hoc de Tukey revelaron que los grupos con un 5 % y un 10 % de sustitución tenían resistencias significativamente menores en comparación con el grupo con un 1,83 % de sustitución. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre el 5 % y el 10 %. En cuanto a la edad de curado (véase el apéndice 11, tabla 14), se encontraron diferencias significativas entre los días 7 y 14, y entre los días 7 y 28, pero no entre los días 14 y 28, lo que sugiere que el mayor aumento de la resistencia se produce antes de los 14 días de curado. (ver figura 18)

Figura 18. Resistencias promedio por cada día de ensayo de cascarillas de arroz.



5.4.3 Anova multivariable de las dosificaciones de cascarillas de arroz y huevo

Mediante el uso de un Anova multifactorial se realizó un análisis para determinar el efecto del porcentaje de sustitución con carbón de arroz, cascarilla de arroz y el efecto de la edad sobre

la resistencia a compresión del concreto, el modelo mostro un buen ajuste (ver apéndice K, tabla 84) indicando que es que los factores aproximadamente el 81% de la variación de los resultados.

Se pudo observar que la edad de curado tuvo el mayor efecto sobre la resistencia final con un aumento medio de 3,32 MPa de 7 a 14 días, y un aumento medio de 5,40 MPa de 7 a 28 días. El porcentaje de huevos mostró un efecto negativo y significativo ya que por cada 1% de cáscaras de huevo sustituidas, la resistencia disminuyó unos 0,097 MPa. El porcentaje de arroz también tuvo un efecto negativo muy significativo, con una reducción aproximada de la resistencia de 0,049 MPa por cada 1% de sustitución.

Estos resultados muestran que, aunque la sustitución de residuos afecta a la resistencia del hormigón, es el tiempo del curado la que tiene el mayor impacto (ver tabla 12).

Tabla 12. *Estimaciones de los parámetros de efectos fijos*

Names	Effect	Estimate	SE	95% Confidence Interval		β	df	t	p
				Lower	Upper				
(Intercept)	(Intercept)	9.937	0.205	9.524	10.349	0	49	48.4	<.001
Edad1	14-jul	3.319	0.503	2.308	4.330	1	49	6.6	<.001
Edad2	28-jul	5.403	0.503	4.392	6.413	1.629	49	10.74	<.001
%C_Huevo	%C_Huevo	-0.097	0.032	-0.160	-0.033	-0.19	49	-3.03	0.004
%C_Arroz	%C_Arroz	-4.947	0.551	-6.054	-3.840	-0.561	49	-8.98	<.001

5.4.4 Anova multivariable del mortero de referencia vs tipo de residuo

5.4.4.1 Anova multivariable referencia vs sustituciones de solo %C_Arroz. Se realizó un análisis bivalente de la varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de la edad, el porcentaje de sustitución del arroz y su interacción sobre la resistencia a la compresión. Los resultados (ver tabla

13) mostraron que tanto la edad como el %C_arroz tuvieron efectos muy significativos sobre la resistencia. Además, el efecto significativo de la interacción entre edad y %C_arroz indica que el efecto del %C_arroz sobre la resistencia depende del tiempo de curado de la mezcla.

Tabla 13. *Anova multivariable edad vs %C_Arroz.*

ANOVA - Resistencia [Mpa]						
	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p	
Edad	97.5	2	48.74	34.36	<.001	
%C_Arroz	475	3	158.32	111.63	<.001	
Edad * %C_Arroz	60	6	9.99	7.05	<.001	
Residuos	34	24	1.42			

Las pruebas post hoc de Tukey confirmaron diferencias significativas en la resistencia entre todos los grupos de edad probados (7, 14 y 28 días). En todos los casos, se produjo un aumento significativo de la resistencia al aumentar la edad de curado, siendo la diferencia más pronunciada entre 7 y 28 días, seguida de entre 7 y 14 días y entre 14 y 28 días (ver tabla 14)

Tabla 14. *Post hoc edad - Referencia vs %C_Arroz.*

Comparaciones Post Hoc - Edad							
Comparación							
Edad	Edad	Diferencia de Medias	EE	gl	t	ptukey	
7	-	14	-2.46	0.486	24	-5.05	<.001
	-	28	-4	0.486	24	-8.22	<.001
14	-	28	-1.54	0.486	24	-3.17	0.011

Nota. Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas

Las pruebas post hoc de Tukey confirmaron diferencias significativas en la resistencia entre todos los grupos de edad probados (7, 14 y 28 días). En todos los casos, se produjo un aumento significativo de la resistencia con el incremento de la edad de curado, con la diferencia más

pronunciada entre 7 y 28 días, seguida de entre 7 y 14 días, y entre 14 y 28 días. Los resultados mostraron que la resistencia era significativamente mayor en el grupo de referencia (0% de arroz) en comparación con los grupos con 5%, 10% y 1,83% de reemplazo. también hubo una diferencia significativa entre los grupos de 5% y 1,83%. Sin embargo, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de 5% y 10%. Estos resultados permiten concluir que, en general, la resistencia a la compresión tiende a disminuir con el aumento de la sustitución del arroz (ver tabla 15).

Tabla 15. *Post hoc del %C Arroz referencia vs %C Arroz.*

Comparaciones Post Hoc - %C_Arroz							
Comparación							
%C_Arroz	%C_Arroz	Diferencia de Medias	EE	gl	t	ptukey	
0	-	5	8.206	0.561	24	14.616	<.001
	-	10	7.822	0.561	24	13.933	<.001
	- 1,83		1.712	0.561	24	3.05	0.026
5	-	10	-0.383	0.561	24	-0.683	0.903
	- 1,83		-6.493	0.561	24	-11.566	<.001
10	- 1,83		-6.11	0.561	24	-10.884	<.001

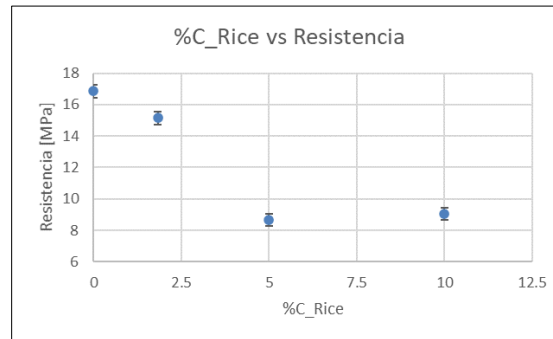
Nota. Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas

El análisis comparativo post hoc de la interacción entre la edad de curado y el porcentaje de sustitución del arroz mostró diferencias significativas en la resistencia a la compresión. En general, los grupos con porcentajes de sustitución más bajos y edades de curado más altas tuvieron la mayor resistencia. Las diferencias más notables se produjeron entre los 28 días de curado y los porcentajes bajos (0 % y 5 %), donde se alcanzaron los valores de resistencia más altos. A medida que aumentaba el porcentaje de sustitución, la resistencia disminuía, especialmente con edades de curado más largas, lo que confirma el efecto negativo del aumento de la sustitución en la resistencia del mortero. Sin embargo, algunas comparaciones no mostraron diferencias significativas, lo que

sugiere que el impacto del sustituto es menos relevante a determinadas edades de curado (ver apéndice A).

La resistencia a la compresión disminuyó significativamente cuando el porcentaje de residuos de arroz superó el 1,83 %. El mortero de referencia (0 %) mostró la resistencia media más alta, siendo estadísticamente superior a los morteros con un 5 % y un 10 % de residuos. Sin embargo, la adición de solo un 1,83 % de residuos no redujo significativamente la resistencia, especialmente durante los 28 días de curado (ver figura 19).

Figura 19. %C_Arroz vs Referencia



Este comportamiento sugiere que para aplicaciones en las que la resistencia máxima no es importante, los morteros con un bajo porcentaje de sustitución (1,83%) son mecánicamente viables. Las mezclas con un porcentaje del 5% o superior mostrarán una caída repentina de la resistencia y no se recomiendan para aplicaciones estructurales.

5.4.4.2 Anova multivariable referencia vs sustituciones de solo %C_Huevo. El análisis de la varianza reveló que el porcentaje de sustitución de la cáscara (%C_Huevo) y la edad, así

como la interacción entre estos dos factores, afectaban significativamente a la resistencia a la compresión (ver tabla 16).

Tabla 16. *Anova multivariable - Edad vs %C Huevo.*

ANOVA - Resistencia [Mpa]						
	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p	
%C_Egg	644	6	107.36	23.85	<.001	
Edad	267	2	133.63	29.69	<.001	
%C_Egg * Edad	185	12	15.43	3.43	<.001	
Residuos	432	96	4.5			

La prueba de post hoc de Tukey no mostró diferencias significativas en la resistencia a tasas de reemplazo bajas (0 % comparado con 5 %, 10 % y 15 %). Sin embargo, a partir de una tasa de reposición del 20%, hubo una diferencia significativa en la resistencia en comparación con los grupos con menor %C_Huevo. Este resultado indica que un aumento moderado del contenido de cáscara de huevo no tiene un efecto significativo sobre la resistencia, pero que se producen cambios significativos en la resistencia a partir de valores más altos. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de optimizar el contenido de cáscara de huevo para maximizar la resistencia a la compresión (ver tabla 17).

Tabla 17. *Post hoc edad - Referencia vs %C Huevo.*

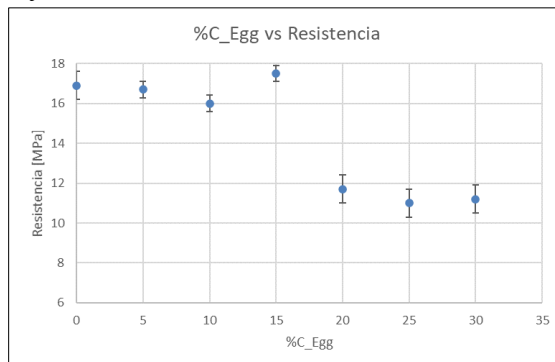
Comparaciones Post Hoc - %C_Egg							
Comparación							
%C_Egg	%C_Egg	Diferencia de Medias	EE	gl	t	ptukey	
0	-	5	0.174	0.817	96	0.214	1
	-	10	0.844	0.817	96	1.033	0.945
	-	15	-0.638	0.817	96	-0.782	0.986
	-	20	5.174	1	96	5.174	<.001
	-	25	5.834	1	96	5.834	<.001
5	-	30	5.621	1	96	5.621	<.001
	-	10	0.669	0.577	96	1.159	0.907

-	15	-0.813	0.577	96	-1.407	0.797	
-	20	5	0.817	96	6.123	<.001	
-	25	5.66	0.817	96	6.932	<.001	
-	30	5.447	0.817	96	6.67	<.001	
10	-	15	-1.482	0.577	96	-2.566	0.148
-	20	4.331	0.817	96	5.304	<.001	
-	25	4.991	0.817	96	6.112	<.001	
-	30	4.777	0.817	96	5.851	<.001	
15	-	20	5.813	0.817	96	7.118	<.001
-	25	6.473	0.817	96	7.927	<.001	
-	30	6.259	0.817	96	7.665	<.001	
20	-	25	0.66	1	96	0.66	0.994
-	30	0.447	1	96	0.447	0.999	
25	-	30	-0.213	1	96	-0.213	1

Nota. Las comparaciones se basan en medias marginales estimadas

El análisis post hoc de la interacción entre la edad de curado y el porcentaje de sustitución de la cáscara del huevo reveló diferencias significativas en la resistencia a la compresión. En general, los valores más altos de resistencia se observaron en los grupos con porcentajes bajos de cáscara de huevo y edades de curado más largas. Para edades cortas (7 días), no hubo diferencias significativas entre los grupos de baja sustitución y las edades más altas. Sin embargo, a medida que el porcentaje de cáscara de huevo aumentaba por encima del 20 %, la resistencia se veía afectada negativamente, especialmente a edades de 14 y 28 días, donde las diferencias entre los grupos eran más pronunciadas y estadísticamente significativas. Esto confirma que el efecto de la cáscara de huevo depende tanto del porcentaje de sustitución como de la edad de curado, y sugiere que encontrar un equilibrio óptimo es clave para maximizar la resistencia (Ver apéndice B).

El análisis de las medias marginales estimadas muestra una clara tendencia a la disminución de la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de cáscara de huevo. Los valores medios de resistencia descendieron de 16,9 MPa en el grupo de control (0 % C_Huevo) a 11,2 MPa en el grupo con un 30 % de sustitución, con una relación estadísticamente significativa, como lo confirman los intervalos de confianza del 95 %. El gráfico (Ver figura 20) muestra claramente esta relación inversa entre el aumento de la sustitución y la disminución de la resistencia.

Figura 20. %C_Huevo vs Referencia.

5.4.4.3 Anova multivariable referencia vs sustituciones con %C_Huevo - %C_Arroz.

Se utilizó un modelo lineal general para evaluar los efectos de la sustitución de la cascarilla de arroz, la cáscara de huevo, la edad y su interacción sobre la resistencia a la compresión. El modelo mostró un excelente ajuste, indicando que el 93,5 % de la variación de la firmeza se explicaba por los factores evaluados (ver tabla 18).

Tabla 18. Resumen de ajuste del modelo lineal.

Model	
Info	
Info	
Estimate	Linear model fit by OLS
Call	Resistencia [Mpa] ~ 1 + `%C_Arroz` + `%C_Arroz` + Edad + `%C_Arroz`:`%C_Huevo` + `%C_Arroz`:Edad + `%C_Huevo`:Edad + `%C_Arroz`:`%C_Huevo`:Edad
R-squared	0.935
Adj. R-squared	0.921

El análisis de la varianza mostró que %C_Arroz, %C_Huevo, la edad y varias de sus interacciones tuvieron efectos muy significativos sobre la resistencia. En particular, %C_Arroz, la edad y la interacción %C_Arroz*Edad tuvieron tamaños de efecto significativos (ver tabla 19)

Tabla 19. *Pruebas ómnibus ANOVA*

ANOVA Omnibus tests						
	SS	df	F	p	η^2p	
Model	997.46	11	66.57	<.001	0.935	
%C_Arroz	194.65	1	142.89	<.001	0.737	
%C_Huevo	30.16	1	22.14	<.001	0.303	
Edad	176.82	2	64.9	<.001	0.718	
%C_Arroz * %C_Huevo	114.76	1	84.24	<.001	0.623	
%C_Arroz * Edad	43.29	2	15.89	<.001	0.384	
%C_Huevo * Edad	9.56	2	3.51	0.037	0.121	
%C_Arroz * %C_Huevo * Edad	41.68	2	15.3	<.001	0.375	
Residuals	69.47	51				
Total	1066.93	62				

En cuanto a los parámetros del modelo, se observó que un aumento del %C_Arroz se asociaba a una disminución significativa de la resistencia, mientras que el %C_Arroz tenía un ligero efecto positivo. La edad mostró un efecto positivo significativo, aumentando la resistencia con la duración del tratamiento. Las interacciones entre %C_arroz y entre %C_arroz y edad también fueron significativas, lo que refleja la complejidad de los efectos combinados de estos factores sobre la resistencia.

Estos resultados confirman la influencia tanto de los reemplazos individuales como de sus combinaciones con la edad en la resistencia a la compresión, lo cual resulta fundamental para optimizar el diseño de mezclas (ver tabla 20).

Tabla 20. *Estimaciones de los parámetros de efectos fijos.*

Fixed Effects Parameter Estimates									
Names	Effect	Estimate	SE	95% Confidence Interval		β	df	t	p
				Lower	Upper				
(Intercept)	(Intercept)	13.709	0.3371	13.032	14.386	0	51	40.66	<.001
%C_Arroz	%C_Arroz	-4.39	0.3672	-5.127	-3.653	-2.208	51	-11.95	<.001
%C_Huevo	%C_Huevo	0.163	0.0347	0.0937	0.233	0.316	51	4.71	<.001
Edad1	14-jul	7.57	0.8258	5.912	9.228	1.825	51	9.17	<.001

Edad2	28-jul	8.623	0.8258	6.9652	10.281	2.079	51	10.44	<.001
%C_ Arroz *	%C_ Arroz *	-0.26	0.0283	-0.3167	-0.203	-1.048	51	-9.18	<.001
%C_ Huevo	%C_ Huevo								
%C_ Arroz *	%C_ Arroz * 14 -	-4.877	0.8995	-6.683	-3.071	-2.453	51	-5.42	<.001
Edad1	7								
%C_ Arroz *	%C_ Arroz * 28 -	-3.642	0.8995	-5.4475	-1.836	-1.832	51	-4.05	<.001
Edad2	7								
%C_ Huevo *	%C_ Huevo * 14 -	0.224	0.085	0.0534	0.395	0.433	51	2.64	0.011
Edad1	7								
%C_ Huevo *	%C_ Huevo * 28 -	0.132	0.085	-0.0384	0.303	0.256	51	1.56	0.126
Edad2	7								
%C_ Arroz *	%C_ Arroz *	-0.373	0.0694	-0.5127	-0.234	-1.506	51	-5.38	<.001
%C_ Huevo *	%C_ Huevo * 14 -								
Edad1	7								
%C_ Arroz *	%C_ Arroz *	-0.263	0.0694	-0.402	-0.124	-1.06	51	-3.79	<.001
%C_ Huevo *	%C_ Huevo * 28 -								
Edad2	7								

5.5 Determinación del porcentaje óptimo de sustitución mediante regresión lineal para estimar el comportamiento del mortero en dosis no ensayadas

La regresión lineal es una técnica estadística que modela la relación entre una variable independiente y una dependiente, permitiendo predecir valores desconocidos a partir de datos observados. Su aplicación en este estudio consiste en establecer una ecuación que describa el comportamiento de la resistencia según las distintas dosificaciones. El análisis proporciona una ecuación lineal y un coeficiente de determinación (R^2), cuyo valor refleja el nivel de ajuste entre la recta y los datos experimentales. Un R^2 elevado indica una relación sólida y predicciones confiables. En este contexto, la regresión lineal no solo permite evaluar el desempeño actual de las dosificaciones, sino también proyectar combinaciones futuras viables, ofreciendo una herramienta de optimización para el análisis.

5.5.1 Regresión lineal para la hipótesis A

Lo primero que se necesita para llevar a cabo esta técnica estadística es recolectar los datos de las variables independientes y las dependientes, en este caso la variable independiente son los

porcentajes de sustitución que se trabajaron, mientras que la dependiente es la resistencia que estas dosificaciones presenten durante el ensayo a compresión. (ver tabla 21)

Tabla 21. *Valores de resistencia para aplicar la regresión lineal de la hipótesis A.*

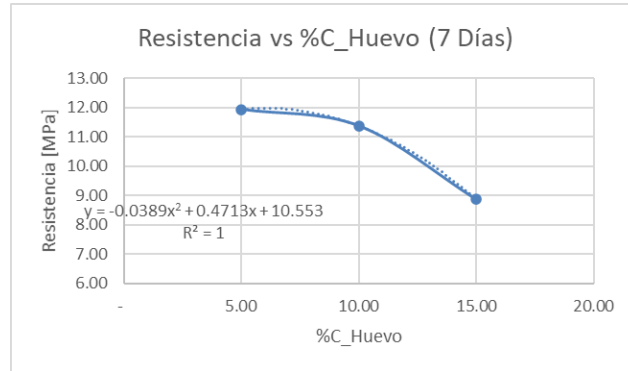
Muestras	%C_Huevo	7 Días	14 Días	28 Días
		Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]
#9	5%	11.94	17.24	18.25
#10	10%	11.37	14.52	15.17
#11	15%	8.86	16.93	18.78

Con estos datos ya es posible hacer el modelo matemático este ajusto una ligera curvatura negativa (ver figura 21), pero con tan solo 3 datos para el análisis el máximo teórico se localiza muy próximo a la primera resistencia experimental. Esto sugiere que, hasta donde se ha medido, la máxima resistencia se da en el borde inferior del rango de sustitución, por lo que no puede asegurarse la existencia de un óptimo intermedio verdadero, solo que un máximo local está alrededor de 5-6% bajo las condiciones de este experimento. (ver tabla 22)

Tabla 22. *Determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis A.*

		Estimación lineal 7 Días	
a	b	Porcentaje óptimo de C_Huevo a los 7 días	6.06
-0.039	0.471		
Resistencia obtenida con el valor óptimo		Y [Mpa] =	11.98

Figura 21. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis A.

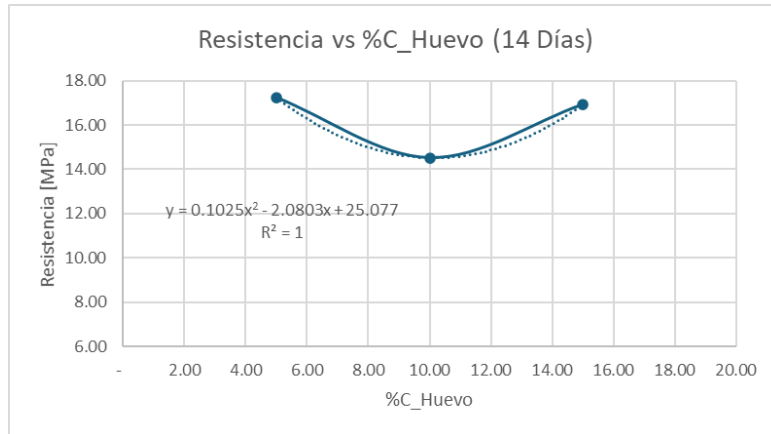


Ahora para el día 14 se usó un ajuste cuadrático que determina un máximo matemático ligeramente por encima del 10%, pero en el rango experimental la máxima resistencia ocurre al 5%.de reemplazo (ver figura 22). En vista de esto lo mejor que se podría hacer es realizar más mediciones con porcentajes menores al 10% para observar mejor la curva parabólica mencionada. (ver tabla 23)

Tabla 23. Determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis A.

Estimación lineal 14 Días			
a	b	Porcentaje óptimo de C_Huevo a los 7días	10.15
0.103	-2.080		
Resistencia obtenida con el valor optimo	Y [Mpa] =		14.52

Figura 22. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis A.

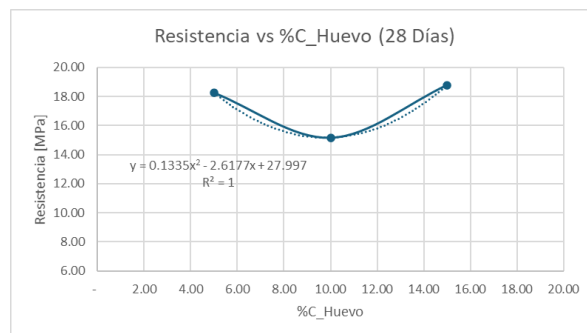


Por último, para el día 28 se hace una curva cuadrática ajustada por mínimos cuadrados esto con el fin de modelar el descenso y ascenso observados en los datos de la resistencia (ver figura 23), pero la verdadera tendencia podría ser creciente hacia los valores evaluados mayores al 15% de sustitución o presentar una inflexión fuera del rango ensayado. (ver tabla 24)

Tabla 24. Determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis A.

Estimación lineal 28 Días	
Porcentaje óptimo de C_Huevo a los 28 días	15.00
Resistencia obtenida con el valor optimo Y [Mpa] =	19.18075

Figura 23. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis A.



5.5.2 Regresión lineal para la hipótesis B

Al igual que en el anterior el primer paso será hacer la recolección de datos para realizar las regresiones lineales (ver tabla 25)

Tabla 25. Valores de resistencia para aplicar la regresión lineal de la hipótesis B.

Muestras	%C_Huevo	7 Días	14 Días	28 Días
		Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]
#1	5	8.48	19.06	17.99
#2	10	14.07	19.01	16.26
#3	15	16.69	21.48	18.24
#4	20	11.33	11.51	12.19
#5	25	9.78	11.73	10.35
#6	30	11.13	11.73	10.82

El análisis estadístico de los resultados obtenidos para la resistencia a compresión a 7 días evidencia un comportamiento no lineal en función del porcentaje de sustitución del agregado fino por cascara de huevo triturada. Se identificó que la resistencia máxima se alcanza aproximadamente al 12.5 % de sustitución, con un valor estimado de 15.78 MPa (ver figura 24). A partir de este punto, un mayor porcentaje de incorporación genera una disminución en la resistencia.

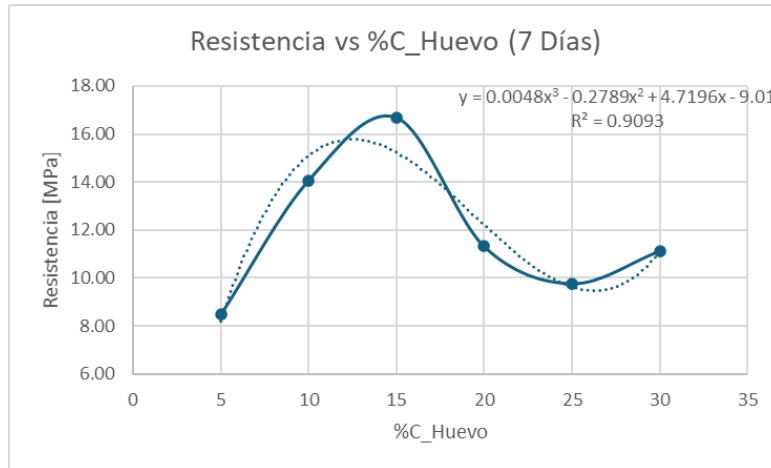
Este comportamiento indica la existencia de un umbral óptimo de sustitución, más allá del cual el exceso de cáscara de huevo afecta negativamente las propiedades mecánicas del concreto. El modelo estadístico empleado permitió describir con precisión esta tendencia, mostrando la importancia de definir límites adecuados para la utilización de agregados alternativos en mezclas de concreto. (ver tabla 26)

Tabla 26. Determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis B.

Estimación lineal 7 Días				
a	b	c	%C_Huevo optimo	26.25

0.00	-0.28	4.72	12.49
Resistencia obtenida con el valor optimo			Y [Mpa] = 15.78

Figura 24. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 7 de la hipótesis B.



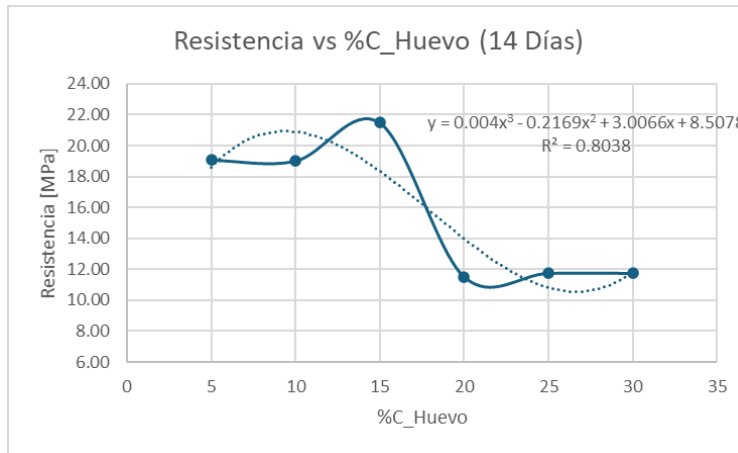
El ajuste polinómico de tercer grado para los datos a 14 días revela un comportamiento no lineal entre la resistencia a compresión y el porcentaje de cáscara de huevo. El modelo indica que el valor óptimo de reemplazo es aproximadamente 9.35 %, alcanzando una resistencia a la compresión máxima estimada de 20.92 MPa. A partir de este punto, la resistencia disminuye rápidamente. (ver figura 25) El coeficiente de determinación ($R^2=0.8038$) muestra que el modelo describe razonablemente bien la tendencia general, aunque existe mayor dispersión que a los 7 días. Esto puede deberse a efectos de la hidratación y la interacción de la cáscara de huevo en la microestructura del concreto. (ver tabla 27)

Por lo tanto, la ecuación es útil para analizar tendencias y realizar estimaciones aproximadas dentro del rango experimental, pero sus predicciones deben interpretarse con cautela y apoyarse en resultados experimentales para asegurar su validez.

Tabla 27. Determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis B.

Estimación lineal 14 Días				
a	b	c	%C_Huevo optimo	26.80
0.00	-0.22	3.01		9.35
Resistencia obtenida con el valor optimo			Y [Mpa] =	20.93

Figura 25. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 14 de la hipótesis B.

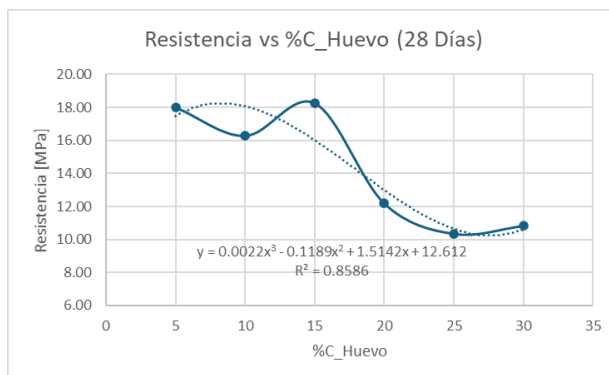


El ajuste polinómico de tercer grado para los datos de 28 días muestra que la resistencia máxima, estimada en 20.8 MPa, se alcanza con un 8.26 % de sustitución de agregado fino por cáscara de huevo (ver tabla 28). A partir de este valor, la resistencia disminuye de forma considerable conforme aumenta el porcentaje de sustitución. El coeficiente de determinación ($R^2=0.8586$) indica que el modelo describe adecuadamente la tendencia general de los resultados. Por tanto, la ecuación resulta útil para estimar tendencias y el comportamiento general dentro del rango experimental. (ver figura 26)

Tabla 28. Determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis B.

Estimación lineal 28 Días				
a	b	c	%C_Huevo optimo	27.77
0.00	-0.12	1.51		8.26
Resistencia obtenida con el valor optimo			Y [Mpa] =	20.7985045

Figura 26. Grafica para la determinación de una dosificación nueva para el día 28 de la hipótesis B.



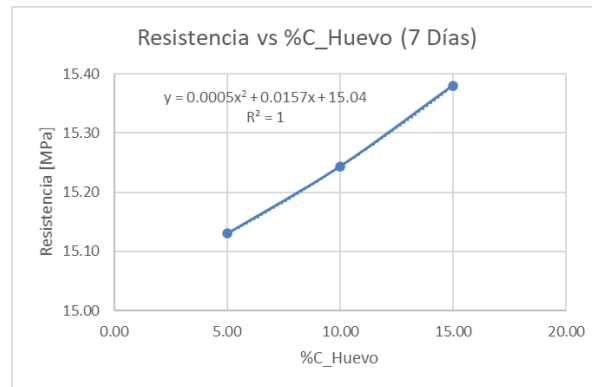
5.5.3 Regresión lineal para la hipótesis C

Para realizar la regresión lineal se tomaron todas aquellas dosificaciones donde sus sustituciones tuvieran al menos 3 porcentajes de sustitución distinto (ver tabla 29), esto con el fin de poder realizar una regresión lineal y a su vez una línea de tendencia polinómica de 2 o 3 grado.

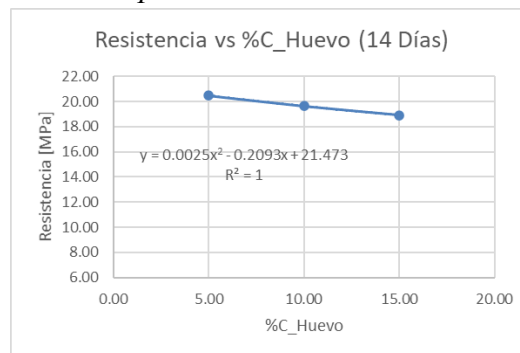
Tabla 29. Regresión lineal hipótesis C.

Muestras	%C_huevo	7 Dias	14 Dias	28 Dias
		Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]
#1	5.00	15.13	20.49	21.52
#2	10.00	15.24	19.63	18.78
#3	15.00	15.38	18.90	22.14

Según la ecuación multicomponente, la resistencia a la compresión a los 7 días de edad aumenta con el aumento de la proporción de cáscara de huevo y concuerda bien ($R^2 = 1$). No se observaron valores máximos en el intervalo analítico (5% y 15%), lo que indica que la adición de cáscara de huevo en este intervalo mejora la resistencia temprana de la solución. Estos resultados indican que la sustitución parcial en este rango es beneficiosa, y animan a explorar porcentajes más elevados para determinar el límite óptimo (ver figura 27).

Figura 27. Gráfico regresión lineal hipótesis C - 7 días.

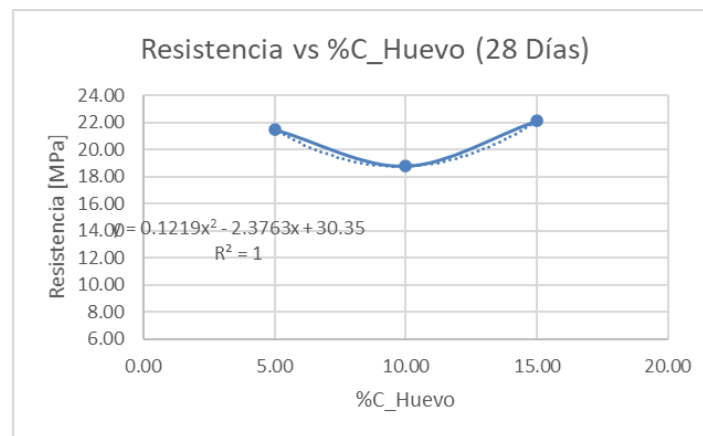
Con un coeficiente de determinación $R^2 = 1$, lo que indica una concordancia perfecta con los datos experimentales. El valor negativo del término lineal y el valor positivo del término cuadrático reflejan una ligera tendencia a la disminución de la resistencia con el aumento del porcentaje de cáscara de huevo en el intervalo estudiado (5% y 15%). Este comportamiento sugiere que, a los 14 días de edad, cantidades crecientes de cáscara de huevo tienden a disminuir la resistencia (ver figura 28) siendo aconsejable mantener el porcentaje de sustitución bajo para minimizar la pérdida de características a edades intermedias de curado.

Figura 28. Gráfico regresión lineal hipótesis C - 14 días.

En el caso de los 28 días se observa una curva en U en la que la resistencia a la compresión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de cáscara hasta cierto punto, y luego vuelve a

aumentar. En valores inferiores o superiores a este porcentaje, la resistencia tiende a ser mayor. Por tanto, pueden considerarse dos intervalos óptimos para la edad de 28 días (ver figura 29); porcentajes inferiores al 9,75 % o superiores, siendo el 15 % especialmente favorable para los resultados obtenidos. Estos resultados sugieren que la optimización de la dosificación debe adaptarse en función de la edad de curado deseada.

Figura 29. Gráfico regresión lineal hipótesis C - 28 días.



El análisis de las curvas de resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días muestra que el efecto de la cáscara de huevo como sustitución parcial del árido fino depende de la edad de curado. A los 7 días de edad, la resistencia aumenta con el porcentaje de cáscara de huevo en el rango estudiado, según un modelo polinómico creciente; a los 14 días de edad, se observa una ligera disminución de la resistencia con el aumento de la sustitución; por otro lado, a los 28 días de edad, la dependencia es parabólica, encontrándose una resistencia mínima cerca del 9,75% de cáscara de huevo y un aumento para porcentajes inferiores o superiores a este valor.

En todos los casos, los modelos mostraron una concordancia perfecta ($R^2 = 1$), lo que da confianza a estas tendencias. Estos resultados demuestran la importancia de determinar el

porcentaje óptimo de sustitución en función de la fase de curado de la solución, ya que la respuesta mecánica varía mucho en función del tiempo y la dosis utilizados.

6. **Viga realizada con la dosificación con mejor comportamiento en sus propiedades físico-mecánicas, empleando cáscara de huevo y carbón de arroz**

6.1 Preparación de los materiales y molde

Siguiendo la norma ASTM C348 “Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión de los morteros de cemento hidráulico” esta norma propone la misma dosificación que la NTC – 220 es decir por cada parte de cemento se le agregan 2.75 partes de arena normalizada y una relación de agua cemento del 0.4. Dicho esto, se puede afirmar que las dosificaciones usadas en los cubos pueden ser utilizadas también en las vigas, para esto se usó la dosificación A15 con 5% de sustitución del material cementante por la cascarilla de arroz caolinizada y un 15% de reemplazo de arena por las cascaras de huevo (ver tablas 30 y 31).

Tabla 30. *Dosificación para la viga de mortero alterado.*

Dosificación A15			
#15	0.485	5%	15%

Tabla 31. *Cantidades para la viga de mortero alterado.*

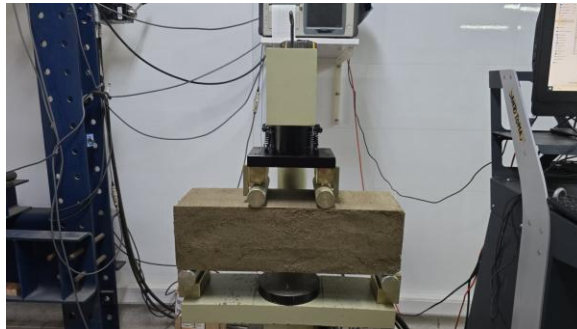
%C_Arroz [g]	%C_Huevo [g]	Arena - %C_Huevo [g]	Cemento - %C_Arroz [g]	Agua [g]
709.2	0	19500	6382.8	3439.62

6.2 Resultados de la viga de mortero alterado.

La viga se dejó curando durante 28 días para determinar la resistencia máxima que esta pueda presentar y compararla con los resultados de una viga de mortero sin alteraciones, llegada

la fecha de la prueba se utilizó la máquina de flexión hidráulica muy parecida a la misma que se usó para los cubos, pero con la diferencia de que esta tiene los puntos de esfuerzo en el centro con 2 puntos de apoyo en los extremos (ver figura 30), esto se hizo con el fin de observar cómo funciona una dosificación frente a los esfuerzo a flexión.

Figura 30. *Máquina de flexión hidráulica.*



Para realizar el ensayo de falla en la viga se montó en la base de la maquina asegurándose de que los apoyos de los extremos se encuentren a 1/3 de las esquinas de la viga una vez hecho esto se puede iniciar la prueba de resistencia.

El resultado de resistencia obtenido por la viga al momento de fallarla fue de 1.99 MPa (ver figura 31) un resultado relativamente bueno frente a los resultados de otras vigas sin alteraciones, de las cuales ya se tenían los datos de resistencia en los archivos del laboratorio de la universidad santo tomas en los cuales los valores rondaban entre 3 MPa y 4 MPa, además la dosificación A#15 había demostrado una pequeña diferencia en la resistencia de los cubos de mortero no estructural por lo tanto es normal que la resistencia presentada por la viga no sea exactamente igual a lo esperado pero si bastante similar tal y como sucedió.

Figura 31. *Viga fallada.*

7. Discusión

Este estudio se enfocó en valorar el impacto del empleo de desechos agroindustriales, concretamente cáscara de huevo (en sus versiones trituradas y pulverizadas) y carbón de arroz calcinado, como alternativas parciales del cemento y del agregado fino en morteros no estructural. Estos materiales se escogieron en base a su disponibilidad en la región, su capacidad para ser valorados y su presencia de compuestos con características fisicoquímicas pertinentes para la matriz cementante, como el carbonato cálcico y la sílice amorfa. El estudio se llevó a cabo siguiendo los estándares de la NTC 3356, que determina una resistencia mínima a compresión de 12.5 MPa durante los 28 días [58].

El análisis experimental se estructuró alrededor de cuatro hipótesis de sustitución: A, B, C y D, en las que se examinaron diferentes métodos de reemplazo y tratamiento de los desechos. Mediante estas hipótesis, se intentó responder a tres cuestiones esenciales: (i) si los desechos incrementan, conservan o deterioran la resistencia mecánica del mortero; (ii) si su impacto se basa en el porcentaje de reemplazo; y (iii) si hay diferencias estadísticamente relevantes entre los tipos de residuo, su tratamiento, la edad de curado y su interacción. Estos cuestionamientos están directamente relacionados con los objetivos propuestos en la investigación, ya sean generales o particulares.

Para responder a estas interrogantes, se utilizaron robustos métodos estadísticos. La resistencia a la compresión se examinó a través de ANOVA unifactorial y multifactorial, pruebas no paramétricas de Mann-Whitney, estudios de medias marginales y modelos de regresión lineal basadas en hipótesis. Estos instrumentos posibilitaron la identificación del impacto individual y combinado de las variables independientes (tipo de desecho, porcentaje de reemplazo, edad), y la definición de patrones de respuesta cuantificables.

Los ensayos se llevaron a cabo a edades de 7, 14 y 28 días, bajo condiciones ambientales reguladas, almacenados en agua a temperatura ambiente (23 ± 2 °C) de acuerdo con la NTC 220 [59], lo que garantizó la uniformidad de las condiciones de curado y disminuyó el error experimental. Se consolidan los resultados obtenidos en las Tablas 7 a 10 y Figuras 14 a 17, mientras que se muestran los modelos de regresión en las Tablas 20 a 28 y Figuras 23 a 31. Las Tablas 43 a 45 en el apéndice I, 79 a 84 en el apéndice K. Resumen los análisis de varianza y las pruebas no paramétricas.

Los residuos mostraron conductas diferentes: mientras que la cáscara de huevo pulverizada demostró un efecto estabilizador y mecánicamente beneficioso en determinadas proporciones, el carbón de arroz demostró una conducta más reactiva al tipo de uso, en particular cuando se empleó como reemplazo del cemento. Estos datos concuerdan con descubrimientos anteriores que han registrado el impacto del contenido de CaCO_3 en la cáscara de huevo para potenciar la hidratación secundaria [75] y las restricciones de la reactividad del carbón de arroz sin tratamiento químico [76].

Además, para corroborar la factibilidad práctica de las dosificaciones escogidas, se creó un componente físico a escala real: una viga de mortero con la mezcla A#15. Se llevó a cabo un ensayo de flexión de acuerdo con la norma ASTM C348, logrando una resistencia de 1.99 MPa,

un valor útil en usos no estructurales. Este hallazgo confirma la utilidad de al menos uno de los prototipos en situaciones de construcción reales, como unidades de mampostería artesanal o morteros de pega.

El análisis estadístico, experimental y normativo resultó en la selección de seis prototipos (A#11, A#15, B#3, B#7, C#3 y D#2) que satisfacen los criterios técnicos definidos, proporcionan niveles de resistencia aceptables y simbolizan diversas combinaciones de desechos, tratamiento y niveles de reemplazo. Estas combinaciones se ven como factibles para usos futuros en componentes no estructurales del entorno construido.

7.1 Hipótesis A - Reemplazar el cemento por carbón de arroz y la arena por cáscara de huevo triturada

Esta suposición estudió la utilización conjunta de ambos desechos con funciones interrelacionadas. A los 28 días, las mezclas A#11 y A#15 excedieron la resistencia mínima de 12.5 MPa, alcanzando 18.02 MPa y 17.26 MPa, respectivamente (consulte la Tabla 7 y la Figura 14). A#15 fue elegida prototipo de prueba y utilizada en la creación de una viga experimental a flexión de acuerdo con ASTM C348, logrando una resistencia de 1.99 MPa (ver Tabla 30), corroborando así su factibilidad para usos no estructurales.

La reacción positiva puede deberse a la habilidad del huevo triturado de funcionar como un material de relleno que incrementa la compacidad de la mezcla, y al suministro de CaCO_3 que puede potenciar la hidratación secundaria. En cantidades moderadas (5 %), el carbón de arroz actuó como un añadido inerte sin afectar de manera significativa el desarrollo de resistencia [77]. Las evaluaciones de ANOVA (ver apéndice I, Tablas 43 a 45) y Mann-Whitney (ver apéndice K, tablas 79 y 80) revelaron discrepancias estadísticas en comparación con la mezcla de referencia.

Las regresiones lineales basadas en la hipótesis A (ver tablas 20–23, Figuras 23–25) indicaron un punto ideal alrededor del 15% de reemplazo completo.

En Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M. (2021). Compressive strength of cement mortar containing Eggshell. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10(8). Las dosificaciones son similares (1:3) a los usados en la hipótesis A (1:2.75), el molde utilizado en la NTC 220 es de 50*50*50 mm y el del artículo es de 7.1*7.1*7.1 cm además de usar una granulometría para la arena. (ver figura 32)

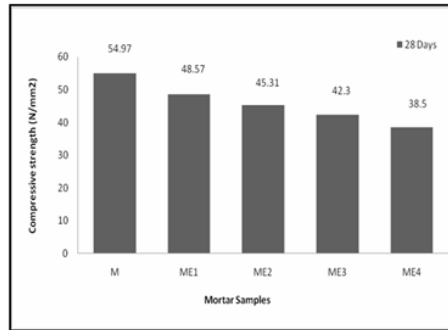
Figura 32. *Dosificación usada en Selvadurai.*

Table 3. Mix proportion of cement mortar containing eggshell

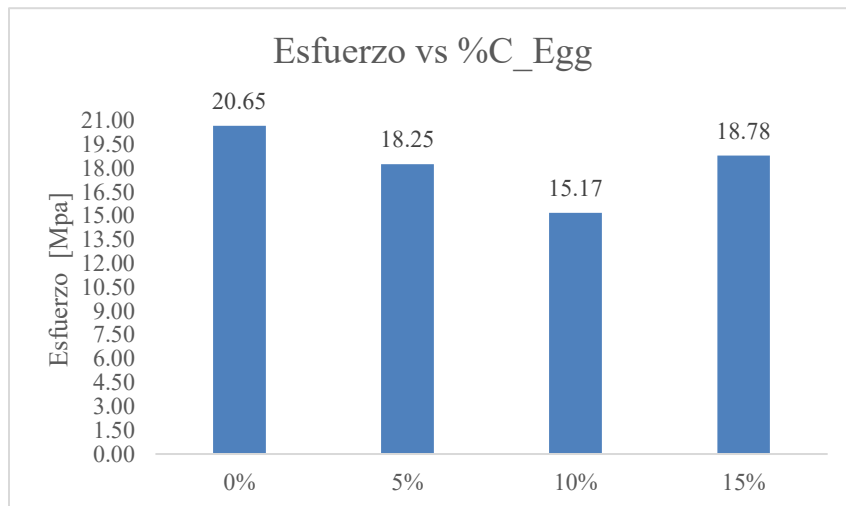
SAMPLE NAME	MORTAR COMPONENTS		
	CEMENT (g)	SAND (g)	EGGSHELL (g)
M	200	600	-
ME ₁	200	570	30 (10%)
ME ₂	200	540	60 (10%)
ME ₃	200	510	90 (15%)
ME ₄	200	480	120 (20%)

Tomado de Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M.

Usando los mismos porcentajes de reemplazo, pero a diferencia de Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M. los resultados obtenidos fueron similares, pero con ciertas diferencias. (ver figuras 33 y 34)

Figura 33. *Tabla de resultados obtenidos en Selvadurai.**Figure 1. Compressive strength of cement mortar sample containing Eggshell*

Tomado de Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M.

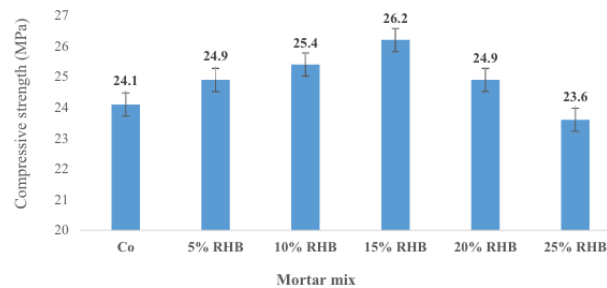
Figura 34. *Resultados obtenidos por el proyecto.*

Al usar el procedimiento y parámetros de NTC 220 se puede notar que no sigue la misma línea de tendencia descendente, sino que varía dependiendo del porcentaje de cascara de huevo triturado utilizado, donde se puede evidenciar que el 15% de sustitución es el más efectivo a diferencia del estudio realizado por Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M. donde el resultado más efectivo es el que menos porcentaje de sustitución realiza.

Por otro lado, en Shah, M. Y., Rauf, M., Satti, S. A., Ahmad, I., & Riaz, M. R. (2024). Investigating the Effect of Rice Husk Biochar on Mechanical Properties and Chemical Resistance

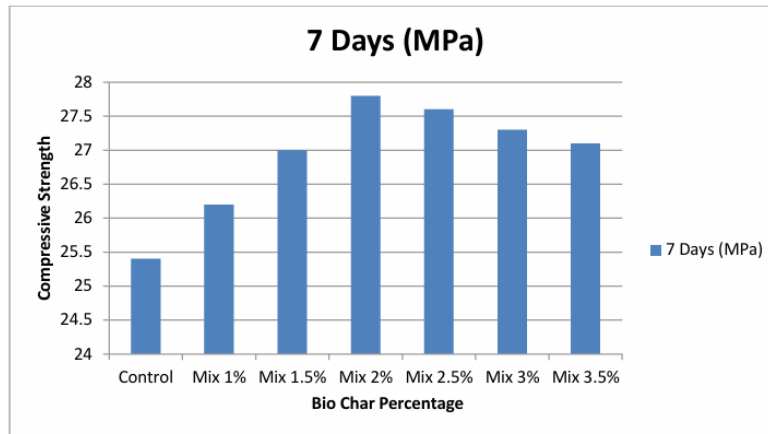
of Concrete. *Sustainable Journal of Environmental Technology (SJET)*, 15(2), 1-10. Y en Mahmoud, A. A., El-Sayed, A. A., Fathy, I. N., Fawzy, S., Alturki, M., Elfakharany, M. E., Abouelnour, M. A., Mahmoud, K. A., & Dahish, H. A. (2025). Evaluation of rice husk biochar influence as a partial cement replacement material on the physical, mechanical, microstructural, and radiation shielding properties of ordinary concrete. *Construction and Building Materials*, 472. Demuestran que el estudio de Mahmoud et al. Hay potencial de un RHB con alto contenido de aluminio para maximizar la resistencia hasta un 15% de reemplazo, los resultados obtenidos en este proyecto fueron menores debido al estado del carbon de arroz en el estudio de Mahmoud el carbón se encuentra más homogéneo a diferencia del usado en este proyecto que se puede observar resultados más altos a los 28 días. (ver figura 35)

Figura 35. *Grafica de resultados obtenidos en Mahmoud.*



Tomado de Mahmoud, A. A., El-Sayed, A. A., Fathy, I. N., Fawzy, S., Alturki, M., Elfakharany, M. E., Abouelnour, M. A., Mahmoud, K. A., & Dahish, H. A.

Por otro lado, el estudio de Akram et al. Demostró que el porcentaje de reemplazo más idóneo era del 2% que se hacer mucho al resultado obtenido en este proyecto que fue de 1.83% la desventaja de este estudio es que se limita únicamente al ensayo de los 7 días. (ver figura 36)

Figura 36. Resultados obtenidos en Akram.

Tomado de Akram et al.

7.2 Hipótesis B - Reemplazar el cemento por una cáscara de huevo troceada y la arena por carbón de arroz

Esta hipótesis cambia el razonamiento de la A, empleando huevo como adición cementante. La muestra B#3, que contenía un 15% de huevo triturado, llegó a 18.24 MPa tras 28 días (consulte la Tabla 8 y la Figura 15), corroborando así su habilidad para aportar a la matriz cementante. Esto está vinculado a su granulometría reducida y su aporte de carbonato cálcico, que fomenta la hidratación secundaria [76].

La muestra B#7, que utilizó una mínima reemplazo de arena por carbón (1.83 %), logró 14.6 MPa, lo que indica que el carbón puede ser beneficioso como añadido liviano en proporciones reducidas [76]. Las regresiones basadas en la hipótesis B (Tablas 24–27, Figuras 26–28) mostraron una curva ascendente hasta alcanzar un pico del 12.5 % al 15 %, seguida de un descenso. Las evaluaciones de Mann-Whitney (Tablas 73–75) corroboraron que las mezclas con porcentajes reducidos de desechos se comportaron de manera similar a la mezcla control.

En Poornima K B, Darshan, N. B., Manjunath, R. T., Revanasiddappa, K. R., & Sanjay, M. T. (2019). A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete.

International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(05), 1104–1108.

Podemos ver que los resultados de la hipótesis B, al compararse con el trabajo experimental de Poornima et al. (2019), validan la viabilidad del uso de la cáscara de Huevo pulverizada como material para mitigar el consumo de cemento. Si bien las tendencias generales se mantienen (disminución de trabajabilidad, punto óptimo de resistencia). Poornima obtuvo un porcentaje de sustitución (10%) positivo donde se superó la resistencia a compresión de la muestra de control, se observó en los resultados obtenidos en esta hipótesis que hasta el ensayo realizado a los 14 días siguió la misma tendencia, pero a los 28 días se vio presente una pérdida de resistencia que pudo producirse por distintos factores los cuales pueden ser evaluados otra ocasión. El porcentaje de sustitución (15%) a pesar de perder el 15.08 % de resistencia obtuvo una resistencia apta como mortero no estructural. (Ver figuras 37, 38 y 39)

Figura 37. Resistencia obtenida en la sustitución de cascara de huevo a los 14 días.

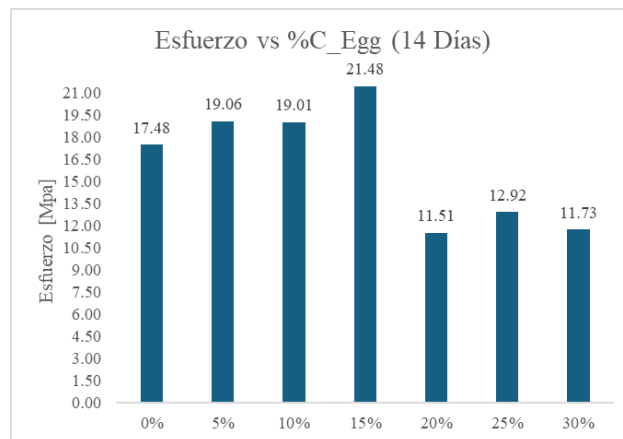


Figura 38. Resistencia obtenida en la sustitución de cascara de huevo a los 28 días.

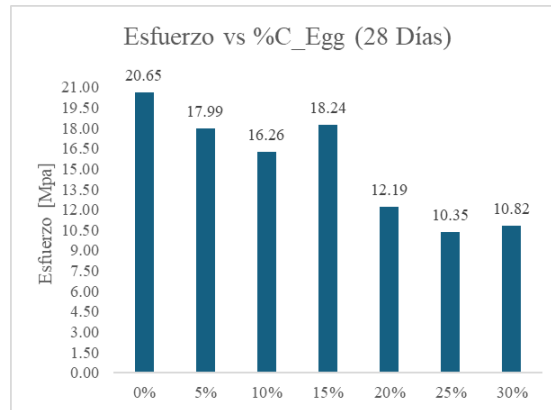
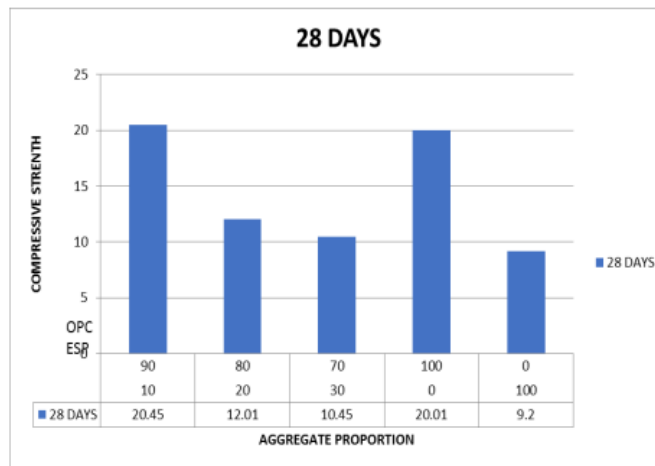


Figura 39. Resistencia obtenida a los 28 dias en el estudio de Poornima K B, Darshan, N. B., Manjunath, R. T., Revanasiddappa, K. R., & Sanjay, M. T.



Tomado de Poornima K B, Darshan, N. B., Manjunath, R. T., Revanasiddappa, K. R., & Sanjay, M. T.

7.3 Hipótesis C Reemplazar la arena por una cáscara de huevo partida o cemento por carbón de arroz (no mezclados)

Esta hipótesis permitió analizar el comportamiento autónomo de cada desecho de acuerdo a su función. Las muestras C#1, C#2 y C#3, que reemplazaron la arena por una cáscara de huevo troceada (10–15 %), alcanzaron los valores de resistencia más destacados del grupo: 21.26 MPa,

21.74 MPa y 22.14 MPa, respectivamente, a lo largo de los 28 días (ver Tabla 9) Además, C#3 demostró un coeficiente de variación bajo, lo que avala su estabilidad mecánica (ver Figura 16).

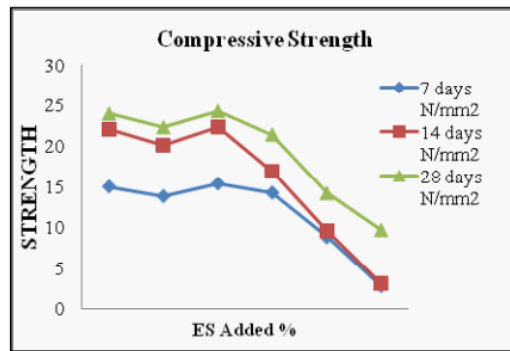
Este comportamiento se basa en la habilidad del huevo triturado para funcionar como material de relleno fino, optimizando la distribución granulométrica y promoviendo la compactación de la matriz cementante [77]. Adicionalmente, su aporte de carbonato cálcico (CaCO_3) ayuda a la creación secundaria de compuestos cementantes, potenciando la cohesión sin poner en riesgo la longevidad inicial del mortero.

El estudio ANOVA evidenció diferencias notables entre los subgrupos, en cambio, la regresión basada en hipótesis (ver Tabla 89 y Figura 58) evidenció un comportamiento parabólico ascendente para el huevo pulverizado (hasta el 15 %) y una curva descendente constante para el carbón de arroz como reemplazo del cemento.

En Karthick, A. S., Sathish Kumar, S., & Kabilan, S. (2018). A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete. *International Journal of Scientific Research and Development (IJSRD)*, 6(5), 329-333. La hipótesis C se enfocó en el uso de la Cáscara de Huevo Pulverizada (ESP) como sustituto del agregado fino (arena), una línea de investigación explorada previamente por Karthick, J., Jeyanthi, R., & Petchiyammal (2012). El estudio de Karthick et al. estableció que, si bien la resistencia del concreto tiende a disminuir a medida que aumenta la sustitución de arena por cascara de huevo pulverizada (ESP), la mezcla lograba cumplir con los requisitos mínimos de resistencia en porcentajes de hasta el **20%**. Al comparar los resultados obtenidos en la hipótesis C con esta tendencia general, se encontró un desempeño similar, los porcentajes de sustitución de utilizados en esta hipótesis fueron de 0%, 5%, 10% y 15% obtuvieron una resistencia a la compresión a los 28 días superior a la muestra de control exceptuando la sustitución de 10% que al igual que en las demás hipótesis tiene una tendencia a

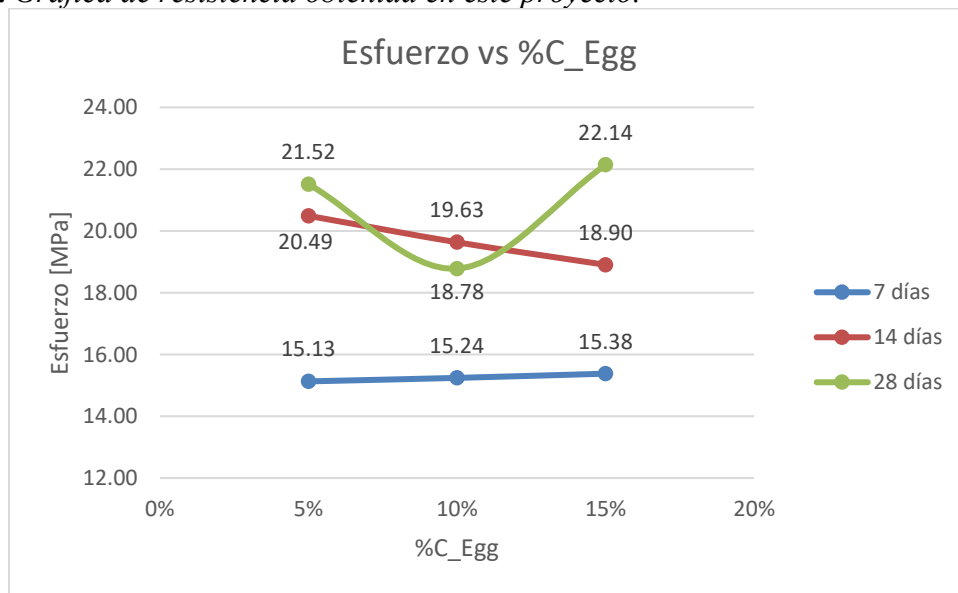
disminuir su resistencia después de los 14 días. Este resultado contradice positivamente la disminución de resistencia que la literatura asocia al reemplazo de arena, sugiriendo que la granulometría de la cascara de huevo pulverizada (ESP) utilizada en este proyecto pudo haber mejorado el empaquetamiento de la matriz cementante. (ver figura 40 y 41)

Figura 40. Grafica de resistencia obtenida en el estudio de Karthick, A. S., Sathish Kumar, S., & Kabilan, S.



Tomado de Karthick, A. S., Sathish Kumar, S., & Kabilan, S.

Figura 41. Grafica de resistencia obtenida en este proyecto.



7.4 Hipótesis D La sustitución combinada de cemento y arena con ambos residuos (todas las dosificaciones)

Examinó la mezcla de cáscara de huevo y carbón de arroz. A pesar de que la mayoría de las mezclas sufrieron una disminución global en la resistencia a compresión, la muestra D#2 — con un 5% de sustitución de cemento y un 10% de agregado fino— alcanzó 13.18 MPa a los 28 días, superando la resistencia mínima fijada (ver Tabla 30 y Figura 49).

Este descubrimiento indica que la utilización conjunta de desechos es técnicamente factible, aunque solo dentro de un margen preciso y meticulosamente balanceado. Las muestras con un porcentaje total más alto de desechos (D#3 a D#5) presentaron disminuciones significativas en el rendimiento y una mayor variabilidad en los resultados, tal como se refleja en la variabilidad de los valores gráficos (Figura 49).

Las regresiones de esta hipótesis (consulte la Tabla 92 y la Figura 61) exhiben curvas con una pendiente negativa constante, lo que señala que los efectos acumulativos de ambas sustituciones suelen disminuir el rendimiento si no se gestionan de forma correcta. En términos experimentales, esto concuerda con otras investigaciones que han evidenciado que las mezclas ternarias o híbridas necesitan modificaciones granulométricas o activadores alcalinos para mantener la estabilidad del sistema [76].

En cuanto a diseño sustentable, la hipótesis D se presenta como una alternativa con gran potencial, aunque necesita ser perfeccionada antes de su puesta en práctica real. Esta hipótesis respalda la realización parcial del objetivo global, y expande las oportunidades de futuros estudios en mezclas más sofisticadas.

En Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S. (2024, marzo). *Partial Replacement of Eggshell and Rice Husk Powder as Cement in Concrete*. Ponencia presentada en la 7th

International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2024), Bangladesh. Y en Rao, N. K., L. M., B. S. R. V., P. K. K., & Sastry, A. P. V. S. R. P. (2019). Experimental Study to Check the Effect of Egg Shell Powder and Rice Husk Ash on the Property of Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(3).

La tendencia de la resistencia a la compresión en este mortero no es comparable con los valores obtenidos en estudios sobre hormigón, como los de Rao et al. (2019) y Urmi et al. (2024), debido a diferencias fundamentales en la matriz y el diseño de la mezcla utilizados (1:1.5:3), lo que invalida una comparación directa de los valores de resistencia. (ver figuras 42 y 43)

Figura 42. Dosificaciones de mezcla usada en Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

Table 3 Cement replacement

Mix Name	Percentage of cement	Percentage of Eggshell	Percentage of Rice Husk
Mix 1	100	0	0
Mix 2	94	4	2
Mix 3	91	6	3
Mix 4	88	8	4

Tomado de Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

Figura 43. Porcentajes de sustitución usados en Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

TABLE III. MIX COMBINATION

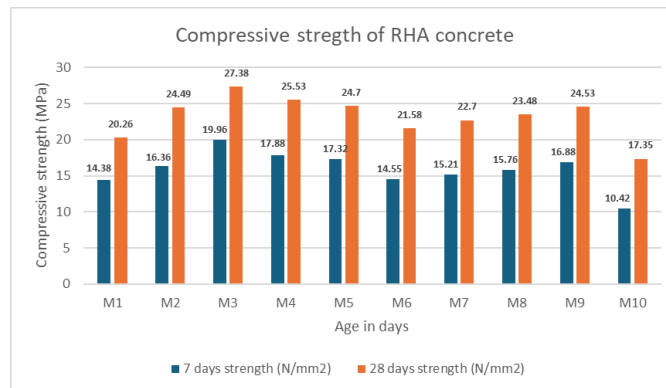
Sl. No.	Mix Design	Cement (%)	ESP (%)	RHA (%)
1	M1	100	0	-
2	M2	97.5	2.5	-
3	M3	95	5	-
4	M4	92.5	7.5	-
5	M5	90	10	-
6	M6	90	5	5
7	M7	87.5	5	7.5
8	M8	85	5	10
9	M9	80	5	15
10	M10	75	5	20

Tomado de Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

Los resultados de este estudio indican que la resistencia máxima alcanzada fue de solo 13,18 MPa a los 28 días, lo que pone de relieve la baja resistencia general y apenas supera el

mínimo de 12,5 MPa para los morteros no estructurales. Esta resistencia máxima se alcanzó con un 10 % de polvo de cáscara de huevo (ESP), un porcentaje significativamente superior al 5 % utilizado por Rao et al. que logro 36,8 MPa (ver figura 44) y el 3 % utilizado por Urmi et al. que obtuvo 24,53 MPa (ver figura 45) en sus estudios. Este umbral más alto del 10 % se atribuye al efecto puzolánico del 1,83 % de ceniza de cáscara de arroz (RHA) dosificada a una tasa constante, que optimiza la reacción con el hidróxido de calcio residual. Sin embargo, a partir del 10 %, la resistencia disminuye progresivamente (ver figura 46), lo que confirma el punto en el que la deficiencia primaria del cemento ya no puede compensarse con la contribución puzolánica, lo que da lugar a una resistencia muy inferior a la muestra de control.

Figura 44. *Diferencia de resistencia a la compresión del concreto.*



Tomado de Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

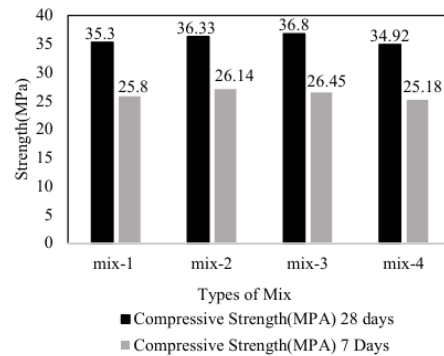
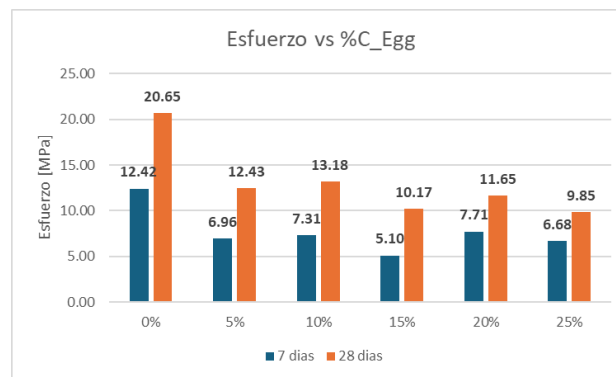
Figura 45. *Diferencia de resistencia del concreto en diferentes dias.*

Figure 4: Compressive Strength of cylindrical specimens

Tomado de Urmí, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S.

Figura 46. *Diferencia de resistencia del concreto con diferentes porcentajes de sustitución de huevo.*

8. Conclusiones

Las propiedades físicas (densidad, gravedad específica y absorción) de los agregados y materiales cementosos, incluidos los residuos agroindustriales, se determinaron mediante ensayos de laboratorio. Esta fase fue esencial para el diseño experimental, ya que permitió ajustar la dosificación y garantizó la uniformidad técnica de las mezclas.

De las 21 dosis evaluadas, la muestra C#3 (15 % de sustitución de arena por cáscara de huevo en polvo) mostró el rendimiento más destacado. Alcanzó una resistencia a la compresión de 22,14 MPa a los 28 días, superando no solo el requisito reglamentario de 12,5 MPa (NTC 3356),

sino también la resistencia del mortero de referencia. Este hallazgo confirma la viabilidad del uso de cáscara de huevo como sustituto de los áridos finos.

El tipo de residuo y su porcentaje de inclusión afectaron directamente a las propiedades mecánicas de los morteros. Los análisis estadísticos (ANOVA, Mann-Whitney) confirmaron diferencias significativas entre los grupos experimentales. La cáscara de huevo demostró ser más eficaz como adición cementosa secundaria, ofreciendo un mejor rendimiento y estabilidad en proporciones del 10 % al 15 %. El carbón de arroz resultó más funcional como agregado fino en proporciones reducidas, preferiblemente inferiores al 5 %, debido a su alta porosidad. Además, la resistencia a la flexión de la muestra A#15 fue técnicamente comparable a la del mortero de referencia, lo que valida su uso en aplicaciones no estructurales.

Esta investigación demuestra que el uso de residuos agroindustriales es una alternativa sostenible con un alto valor añadido. Las dosificaciones seleccionadas (A#11, A#15, B#3, B#7, C#3 y D#2) cumplen los requisitos mecánicos y contribuyen a reducir la huella de carbono al sustituir parcialmente el cemento y la arena. La sustitución parcial, como en la muestra C#3, puede reducir significativamente las emisiones de CO₂, lo que está en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y refuerza la viabilidad de su aplicación en contextos de economía circular y construcción rural.

Las dosificaciones pueden emplearse de la siguiente manera: A#11 y A#15 como mortero para muros, cubos artesanales y revestimientos interiores; B#3 como cubos de relleno, mortero general y unidades secundarias de albañilería; B#7 como juntas, mortero de nivelación ligero o plantillas; C#3 como revestimientos exteriores y elementos prefabricados no estructurales con requisitos moderados; y D#2 como solución de bajo impacto ambiental aplicable a la construcción rural y a procesos de educación ambiental.

Referencias

- [1] ICONTEC. (1997). Método de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (NTC 220). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [2] L. Gutiérrez, El concreto y otros materiales para la construcción. Edición 2, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [3] K. Cury, Y. Aguas , A. Martínez , R. Olivero y L. Chams, «Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,» Revista Colombiana de Ciencia Animal, p. 1, 2017.
- [4] Universidad de los Andes, «Agronegocios e Industria de Alimentos,» Facultad de Administración, 18 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/02/la-avicultura-en-colombia-parte-1/>. [Último acceso: 3 Abril 2023].
- [5] Real Academia Española (RAE), «DLE,» Asociación de academias de la lengua española, Octubre 2014. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/mezclar>. [Último acceso: 3 abril 2023].
- [6] Construpal Ingeniería, «Materiales de Cantera: ¿Qué son los agregados y los pétreos?,» Construpal Ingeniería, 25 julio 2020. [En línea]. Available: <https://construvaling.com/materiales-de-cantera-que-son-los-agregados-y-los-petres/>. [Último acceso: 3 abril 2023].
- [7] Ministerio de Medio Ambiente rural y marino, «Manual de Compostaje,» Paseo de la Infanta Isabel, I, Madrid, 2009.
- [8] Norma Técnica Colombiana, «Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio», ICONTEC, Bogotá, 1994.

- [9] Leroy Merlin, «Leroy Merlin,» Leroy Merlin, 27 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/bricopedia/encofrar-desencofrar.html#:~:text=Es%20la%20acci%C3%B3n%20mediante%20la,estos%20%C3%BAltimos%20los%20m%C3%A1s%20comunes..> [Último acceso: 10 abril 2023].
- [10] Concrelab: Medición Confiable, «Concrelab: Medición Confiable,» Concrelab: Medición Confiable, 22 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.concrelab.com/compresion-cilindros/#:~:text=Esp%C3%A9cimen%3A,hasta%20su%20edad%20de%20cumplimiento.> [Último acceso: 10 abril 2023].
- [11] R. A. Actis, «SegemAR,» 2009. [En línea]. Available: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2980/Escombreras_Raúl_Alberto_Actis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2980/Escombreras_Raúl_Alberto_Actis.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 10 abril 2023]
- [12] D. Idarraga Izasa, «Viabilidad técnica y financiera de la escombrera Guadalcanal del municipio de Pereira,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2014.
- [13] H. O. Benavides Ballesteros y G. E. León Aristizabal, «Información técnicasobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático,» IDEAM, 2007.
- [14] J. D. Moreno, «360 en concreto,» ARGOS, [En línea]. Available: [https://360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios/#:~:text=En%20general%2C%20se%20denomina%20material,aluminosilicatos%20de%20calcio%20\(C%2DA%2DS%2DH\).](https://360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios/#:~:text=En%20general%2C%20se%20denomina%20material,aluminosilicatos%20de%20calcio%20(C%2DA%2DS%2DH).) [Último acceso: 10 abril 2023].
- [15] Banco de la República de Colombia, «Banco de la República de Colombia,» Banco de la

- República de Colombia, [En línea]. Available:
<https://www.banrep.gov.co/es/glosario/producto-interno-bruto-pib>.
- [16] S. Neus, «AIMPLAS,» Instituto Tecnológico del Plástico, [En línea]. Available:
<https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-deflexion/#:~:text=La%20resistencia%20a%20flexi%C3%B3n%20es,perpendicularment e%20a%20su%20eje%20longitudinal.>
- [17] Invest in Colombia, «Colombia CO,» Ministerior de comercio, industria yturismo, 2021. [En línea] Available:
<https://investincolombia.com.co/es/sectores/manufacturas/materiales-de-construccion>.
[Último acceso: 18 Abril 2023].
- [18] DANE, «Estadísticas de Cemento Gris (ECG),» 31 Marzo 2023. [En línea]. Available:
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_ECG_feb23.pdf.
- [19] The European Cement Association, «CEMBUREAU,» 2017. [En línea]. Available:
<https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/>.
- [20] CONPES, Consejo Nacional de Política Económica y Social, «Política Nacional de Edificaciones Sotenibles,» Bogotá, 2018.
- [21] Minambiente, «Minambiente.gov.co,» 2017. Available:
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>.
- [22] FICEM, «FICEM,» 2022. [En línea]. Available: <https://ficem.org/revista-edicion-2022/>.
[Último acceso: 17 Abril 2023].

- [23] P. Moreno, R. Fragozo, S. Vesga, M. GGonzález, L. HeHernández, Gamboay J. Delgado, «Tobacco waste ash: a promising supplementary cementitious material,» *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, pp. 499 - 504, 2018.
- [24] ONU, Organización de las Naciones Unidas, «Noticias ONU,» 7 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611>.
- [25] Y. Vargas y L. Pérez, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente,» *Facultad de Ciencias Básicas*, pp. 59 -72, 2018.
- [26] A. Prada y C. Cortés, «La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral,» *Revista Orinoquia*, pp. 155-170, 2010.
- [27] J. Monteiro, «Manual de gerenciamento integrado de,» IBAM, Rio de Janeiro, 2001.
- [28] P. Pliya y D. Cree, «Limestone derived Huevoshell powder as a replacement in Portland cement mortar,» *Construction and Building Materials*, pp. 1-9, 2015.
- [29] A. Meek, M. Elchalakani, C. Beckett y M. Dong, «Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: A study of mechanical properties, flexure and bond strength.,» *Construction and building materials*, 2021.
- [30] S. Chen, H. Wang y J. Zhou, «Investigating the properties of lightweight concrete containing high,» *Elsevier*, 2013.
- [31] R. Dachowski y P. Kostrzewa, «The Use of Waste Materials in the Construction Industry,» *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 754-758, 2016.
- [32] H. Chore y M. Joshi, «Strength characterization of concrete using industrial waste as cement,» *Nature Switzerland AG*, 2020.
- [33] Gutiérrez de López, El concreto y otros materiales para la construcción, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.

- [34] J. Aguilar, A. Gamoës y R. Fanguero, *Materials and residues, sustainable construction materials*, Ginebra: Trans Tech Publishers, 2014.
- [35] CEMEX, «CEMEX,» CEMEX, [En línea]. Available: <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>. [Último acceso: 27 Abril 2021].
- [36] S. Saval, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro,» *Bioteología*, 2012.
- [37] R. Rodríguez, «Aportaciones al conocimiento del estado medioambiental de microsistemas de interés internacional situado en Castilla - La Mancha,» Universidad de Castilla, Castilla, 1999.
- [38] R. Guerrero y L. Valenzuela, «Agroindustria y medio ambiente,» *Ciencia, tecnología y sociedad*, vol. III, pp. 63 - 83, 2011.
- [39] B. Barragán, Y. Téllez y A. Laguna, «Utilización de residuos agroindustriales,» *Sistemas Ambientales*, pp. 44 - 50, 2008.
- [40] A. M. Sánchez, «Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos,» *Umbaga*, 2010.
- [41] E. Vargas, «El Valor Nutritivo de los subproductos en Costa Rica. Composición química, disponibilidad y uso,» *Nutrición Animal Tropical*, 1995.
- [42] J. Vergara, «Estudio comparativo del rendimiento de furfural a partir de diferentes residuos agrícolas (Cascarilla de arroz, bagazo de caña, zuro de maíz,» Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [43] J. Vargas, P. Alvarado, J. Vega-Baudrit y M. Porras, «Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos,»

- Revista Científica Facultad de Ciencias Químicas*, pp.87-102, 2013.
- [44] A. Angladette, *El arroz*, Barcelona, España: Editorial Blume, 1969.
- [45] P. N. R. Burga Jacobi, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos , Lima, 2018.
- [46] Gobierno Nacional de Colombia, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2019.
- [47] Ellen McArthur Foundation, «Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated Transition,» *Journal of Industrial Ecology*, 2014.
- [48] J. Park, N. Díaz Posada y S. Mejía Dugand, «Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia,» *Cleaner production*, pp. 754-762, 2018.
- [49] M. Burger, S. Stavropoulos, S. Ramkumar, J. Dufourmont y F. Van Oort, «The heterogeneous skill-base of circular economy employment,» *Research Policy*, vol. 48, n° 1, pp. 248-261, 2019.
- [50] J. Korhonen, A. Honkasalo y J. Seppala, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» 2018.
- [51] M. C. Vallejo, M. Pérez Rincón y J. Martínez-Alier, «Metabolic Profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007,» *Journal of industrial ecology*, vol. 15, n° 2, pp. 245-267, 2011.
- [52] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Estrategia Nacional de Economía Circular,» ANDI, Bogotá, 2017.
- [53] Gobierno Nacional de Colombia, «Artículo 79,» de Constitución Política de Colombia, Bogotá, Gobierno Nacional de Colombia, 1998.

- [54] Gobierno Nacional de Colombia, «Artículo 80,» de Constitución Política de Colombia, Bogotá, Gobierno Nacional de Colombia, 1998.
- [55] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, «Título C,» de *NSR - 10*, Bogotá, ICONTEC, 2010.
- [56] ASTM International. (2017). *Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate* (ASTM C29/C29M–17a). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17AINVIAS, «INV E - 217,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, 2013.
- [57] ICONTEC. (2003). *Morteros para unidad de mampostería* (NTC 3356). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [58] ICONTEC, «NTC 3356,» ICONTEC, Bogotá, 2000.
- [59] ICONTEC, «NTC 220,» ICONTEC, Bogotá, 2004.
- [60] S. M. Durán, «Metodología de la Investigación,» Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Bucaramanga, 2020.
- [61] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, «Población,» de *Metodología de la Investigación*, Iztapalapa, Mc Graw Hill, 2006, pp. 174 - 175.
- [62] ICONTEC, «NTC 230,» ICONTEC, Bogotá, 2000.
- [63] J. Sancho, «Análisis Multivariante,» Societat Catalana de Cirugia.
- [64] G. A. Rivera L, *Concreto Simple*, Popayán: Universidad del Cauca, 2000.
- [65] L. L. a. H. Miao, «A specification based approach to testing polymorphic attributes,» de *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*, Seattle, WA, USA, November 8-12.

- [66] R. Pillai, R. Gettu y M. Santhanam, «Uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) en sistemas de concreto armado - - Beneficios y limitaciones,» ALCONPAT, pp. 147 - 164, 2020.
- [67] ICONTEC, «NTC. 221,» ICONTEC, Bogotá, 2010.
- [68] P. Matthey, R. Robayo, J. Díaz, S. Delvasto y J. Monzó, «Influencia del mezclado en dos etapas en la fabricación de ladrillos de mampostería con ceniza de cascarilla de arroz como agregado fino,» Universitat Politècnica de València, 2014.
- [69] DNP, «Departamento Nacional de Planeación,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ods.gov.co/es/objetivos/>.
- [70] Otoko, G. R. (2016). *Comparative elemental analysis of Arroz husk ash calcined at different temperatures using X-ray fluorescence (XRF) technique. American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4(1), 6–9. <https://doi.org/10.12691/ajcea-4-1-2>
- [71] Oyetunji, A., & Akinwumi, I. (2022). *Effect of Calcination on the Chemical and Microstructural Properties of Arroz Husk Ash. Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, 14, 42–55.
- [72] Ng, E. P., Tan, K. B., & Mohamed, A. R. (2024). *Effect of temperature and time on purity, morphology and phase transformation of silica from Arroz husk. Advanced Powder Materials*, 4(1), 100006. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100006>
- [73] Asociación Colombiana de Ingeniería Sismorresistente (ACI). (2010). Norma Sismorresistente NSR-10 (Título D). Recuperado de https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_D.pdf
- [74] Balamurugan, V., & Manoharan, P. D. (2020). Performance evaluation of eggshell powder

- as a partial replacement of cement in concrete. *Construction and Building Materials*, 243, 118232.
- [75] Saraswathy, V., et al. (2014). Effect of rice husk ash as partial cement replacement on durability of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 66, 218–225.
- [76] Marquez, N. D., Atencia, J. D. V., Támara, N. J. M., González, J. D. F., & De Jesús Samper Manga, J. (2024, 6 diciembre). *Evaluación de la utilización del polvo de cáscara de huevo como remplazo parcial del material cementante en mezclas de mortero*. <https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identific/article/view/7819?>
- [77] Paul, B., Basit, H., Hasan, M., & Islam, M. (2024). Sustainable cement mortar production using rice husk and eggshell powder: a study of strength, electrical resistivity, and microstructure. *Construction and Building Materials*, [en línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44268-024-00037-3>
- [78] [Autor(es) no especificado(s)]. (2025). Utilization of rice husk waste as biochar and pozzolanic ashes in cementitious blends. *Journal of Sustainable Construction Materials*, [en línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-025-00179-y>
- [79] [Autor(es) no especificado(s)]. (Año no especificado). Study of Mechanical Properties Using Carbonized Rice Husk and Eggshell. *Materials Science Forum*. Disponible en: <https://www.scientific.net/MSF.1131.99>
- [80] Bedoya-Montoya, C. M., & Medina-Restrepo, C. A. (s. f.). El concreto elaborado con aguas lluvia como aporte ambiental desde la construcción. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292016000100004
- [81] Koteswara Rao, N. et al. (2019). Experimental Study to Check the Effect of Egg Shell Powder and Rice Husk Ash on the Property of Concrete. *International Journal of*

- Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(3).
<https://www.ijert.org/research/experimental-study-to-check-the-effect-of-egg-shell-powder-and-rice-husk-ash-on-the-property-of-concrete-IJERTCONV4IS33002.pdf>
- [82] Mahmoud, A. A. et al. (2025). Evaluation of rice husk biochar influence as a partial cement replacement material on the physical, mechanical, microstructural, and radiation shielding properties of ordinary concrete. *Construction and Building Materials*, 472.
https://www.researchgate.net/publication/394035545_Evaluation_of_rice_husk_biochar_influence_as_a_partial_cement_replacement_material_on_the_physical_mechanical_microstructural_and_radiation_shielding_properties_of_ordinary_concrete
- [83] Selvadurai, S., & Kumar, M. R. S. M. (2021). Compressive strength of cement mortar containing Eggshell. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10(8). https://www.researchgate.net/figure/Compressive-strength-of-cement-mortar-containing-Eggshell_tbl4_343275624
- [84] Shah, M. Y. et al. (2024). Investigating the Effect of Rice Husk Biochar on Mechanical Properties and Chemical Resistance of Concrete. *Sustainable Journal of Environmental Technology (SJET)*, 15(2), 1-10.
<https://sjet.isp.edu.pk/index.php/sjet/article/download/53/36/293>
- [85] Urmi, M. A. J., Awall, M. R., & Nawar, S. (2024, marzo). *Partial Replacement of Eggshell and Rice Husk Powder as Cement in Concrete*. Ponencia presentada en la 7th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2024), Bangladesh.
- [86] Kumar, A. S., Sathish Kumar, S., & Kabilan, S. (2018). A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete. *International Journal of Scientific Research*

and Development (IJS DR), 6(5), 329-333.
<https://www.ijsdr.org/papers/IJS DR1805059.pdf>

- [87] Poornima K B, Darshan, N. B., Manjunath, R. T., Revanasiddappa, K. R., & Sanjay, M. T. (2019). A review study of egg shell powder as a cement replacing material in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(05), 1104–1108. <https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5707.pdf>