

Área de Conocimiento Arquitectura y Construcción

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UN CONCRETO CONVENCIONAL Y UN CONCRETO CON CENIZAS DE MADERA COMO MATERIAL CEMENTANTE COMPLEMENTARIO”

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Civil

Elaborado por:

Br. Adriana Kapzummy
Lobo Aguilar
Carnet: 2020-0119U

Br. Ernestina del
Carmen Pérez Canales
Carnet: 2020-2040S

Tutor:

Ing. Karla Lissette
Rivera Martínez

08 de junio de 2026
Managua, Nicaragua

Dedicatoria

Dedico este trabajo primeramente a Dios, la fuente de toda mi sabiduría y la fuerza que me impulsó a superar los retos de a lo largo de estos cinco años de formación.

A mis padres, y de manera muy profunda a mi mamá, hermana y abuelitos, por su respaldo absoluto y por proveerme de todo lo necesario para salir adelante mis estudios, a mi papá por ser mi inspiración y modelo para estudiar esta carrera; el amor de todos ha sido el motor que ha impulsado mi vida.

A mis grandes amigos, aquellos que hice en las aulas y con quienes compartí el peso del estrés y la satisfacción de cada meta alcanzada: gracias por ser mi red de apoyo en los momentos de crisis y por las sonrisas compartidas en este camino. Y finalmente, a mis mascotas, mis guardianas en las noches de desvelo, cuya ternura me acompañó fielmente en cada plano, informe y en la entrega de este proyecto.

A todos, sepan que los amo, y que este logro también es suyo.

- Adriana Lobo

Dedicatoria

Agradezco infinitamente a Dios por la sabiduría y fortaleza en todo mi caminar, agradezco a mi mamá por el apoyo y esfuerzo recibido no solamente en este éxito alcanzado, siendo mi guía académicamente, gracias a mis hermanos y familia por siempre darme ánimos para llegar a culminar con éxito y cumplir un sueño, Gracias por ser mi compañía durante este proceso. Gracias a ustedes es a quienes les debo mis logros.

- Ernestina Canales

Agradecimientos

A todos los profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería, nuestra alma mater, gracias por haber sido el pilar de nuestra formación académica en todo este tiempo.

Y de manera muy especial, queremos agradecer a la Ing. Karla Rivera. Trabajar en estos meses fue todo un desafío, pero contar con su apoyo constante transformó el camino en algo memorable. Gracias por su dedicación, por su tiempo generoso y por no dejarnos solos en ningún momento, guiándonos con paciencia en cada duda. Sepa que se ganó un lugar muy especial en nuestros corazones; si bien la admiramos como profesional, nos marcó mucho más su calidez y su forma de ser. Más que nuestra asesora, la sentimos como una verdadera amiga. ¡Gracias infinitas!

Resumen

La industria de la construcción enfrenta uno de los mayores retos ambientales debido al uso intensivo de cemento, cuya producción genera elevadas emisiones de CO₂ y efectos adversos en la salud respiratoria. Frente a esta problemática, se plantea la necesidad de explorar alternativas más sostenibles que permitan disminuir dicho impacto sin comprometer la calidad estructural de las edificaciones.

Con este propósito, se desarrolló un estudio experimental orientado a comparar el desempeño de un concreto convencional de 2500 psi frente a mezclas en las que el cemento fue parcialmente sustituido por ceniza de madera como material cementante complementario. Se evaluaron porcentajes de reemplazo del 10%, 15% y 20%, aplicando un enfoque cuantitativo de tipo cuasi-experimental. Para ello, se realizaron ensayos de caracterización de los materiales empleados tales como agregados finos y gruesos, cemento y ceniza de madera considerando propiedades como granulometría, humedad, absorción y gravedad específica.

El diseño de las mezclas se efectuó siguiendo el método ACI 211, estableciendo una mezcla patrón como referencia y tres variantes con sustitución de cemento. Los especímenes cilíndricos elaborados fueron sometidos a pruebas de resistencia y trabajabilidad. Los resultados evidenciaron que la incorporación de ceniza de madera modifica el comportamiento del concreto, manteniendo propiedades aceptables según la normativa ASTM, en función del porcentaje de sustitución.

Se concluye que el uso de ceniza de madera constituye una alternativa viable para la producción de concretos más sostenibles, al reducir el consumo de cemento y aprovechar un residuo con potencial ambiental y económico. Este estudio aporta información relevante que puede servir de base para futuras investigaciones y proyectos constructivos, especialmente en aplicaciones donde no se requieran cargas o resistencias muy elevadas.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: GENERALIDADES -----	1
1.1 INTRODUCCIÓN-----	1
1.2 OBJETIVOS -----	2
1.2.1 Objetivo General -----	2
1.2.2 Objetivos específicos -----	2
1.3 JUSTIFICACIÓN -----	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO -----	4
2.1 Concreto -----	4
2.2 Materiales que conforman el concreto -----	6
2.2.1 Cemento-----	7
2.2.2 Agua -----	8
2.2.3 Agregados -----	8
2.3 Complementos cementantes-----	11
2.3.1 Cenizas de madera-----	11
2.3.2 Propiedades mecánicas y químicas de la ceniza de madera -----	13
2.4 Ensayos del concreto -----	14
2.4.1 Ensayos al concreto en estado fresco-----	14
2.4.2 Ensayos del concreto en estado endurecido -----	15

CAPÍTULO III: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS-----	16
3.1 Reducción de muestras de agregados finos y gruesos a tamaños de ensayo ASTM C 702 -----	16
3.2 Caracterización del agregado fino-----	17
3.2.1 Determinación del análisis granulométrico del agregado fino ASTM C33	17
3.2.2 Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino ASTM C128 -----	19
3.2.3 Determinación de los pesos volumétricos seco suelto y seco compacto del agregado fino ASTM C29 -----	22
3.2.4 Determinación del contenido de humedad del agregado fino ASTM C566	26
3.2.5 Determinación de las impurezas orgánicas en el agregado fino ASTM C40	27
3.3 Caracterización del agregado grueso -----	28
3.3.1 Determinación del análisis granulométrico del agregado grueso ASTM C136	29
3.3.2 Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso ASTM C127 -----	32
3.3.3 Determinación de los pesos volumétricos seco suelto y seco compacto del agregado grueso ASTM C29-----	34
3.3.4 Determinación del contenido de humedad del agregado grueso ASTM C566	37
3.3.5 Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso ASTM C131/C131M -----	38
3.4 Caracterización del cemento-----	40
3.4.1 Determinación de la consistencia normal de pastas de cemento-----	40
3.4.2 Determinación del tiempo de fraguado del cemento por el método de la aguja de Vicat ASTM C 191-----	41

3.4.3	Determinación del peso específico relativo del cemento hidráulico ----	44
3.5	Caracterización del complemento cementante -----	45
3.6	Diseño de mezclas de concreto convencional y con cenizas de madera	45
3.6.1	Diseño de mezclas de concreto utilizando metodología ACI 211 -----	45
3.6.2	Proporcionamiento de la mezcla base -----	51
3.6.3	Proporcionamiento de las mezclas con porcentajes de ceniza-----	52
3.7	Elaboración de las mezclas de concreto-----	54
3.7.1	Resultados en estado endurecido -----	54
3.8	Evaluación comparativa de resultados -----	59
3.8.1	Resultados en estado fresco-----	59
3.8.2	Resumen de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión en todas las mezclas -----	62
3.9	Evaluación del uso de material cementante -----	64
CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----		66
4.1	Conclusiones -----	66
4.2	Recomendaciones -----	67
BIBLIOGRAFÍA -----		68
ANEXOS-----		72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje óptimo de quemado de madera _____	12
Tabla 2. Granulometría del agregado fino _____	17
Tabla 3. Ensayes para obtener gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino _____	21
Tabla 4. Gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino ____	21
Tabla 5. Cálculo de PVSS del agregado fino, ensaye 1 _____	23
Tabla 6. Cálculo del PVSS del agregado fino, ensaye 2 _____	23
Tabla 7. Cálculo del PVSS del agregado fino, ensaye 3 _____	24
Tabla 8. Resultados de los PVSS del agregado fino _____	24
Tabla 9. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 1 _____	24
Tabla 10. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 2 _____	25
Tabla 11. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 3 _____	25
Tabla 12. Resultados de los PVSC del agregado fino _____	25
Tabla 13. Resultados de los Porcentajes de vacíos del agregado fino _____	25
Tabla 14. Contenido de humedad del agregado fino _____	26
Tabla 15. Uso del agregado fino según contenido de impurezas orgánicas ____	27
Tabla 16. Granulometría del agregado grueso _____	30
Tabla 17. Resultados de gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso _____	33
Tabla 18. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 1 _____	35
Tabla 19. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 2 _____	35
Tabla 20. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 3 _____	35
Tabla 21. Resultados de los PVSS del agregado grueso _____	35
Tabla 22. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 1 _____	36
Tabla 23. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 2 _____	36
Tabla 24. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 3 _____	36
Tabla 25. Resultado de los PVSC del agregado grueso _____	36
Tabla 26. Resultado de los Porcentajes de vacíos agregado grueso _____	37
Tabla 27. Contenido de humedad del agregado grueso _____	38
Tabla 28. Porcentaje de desgaste del agregado grueso _____	39

Tabla 29. Consistencia normal del cemento ensayo 1 _____	40
Tabla 30. Consistencia normal del cemento, ensayo 2 _____	41
Tabla 31. Tiempo de fraguado del cemento _____	42
Tabla 32. Peso específico del cemento _____	44
Tabla 33. Selección de F'_{cr} _____	46
Tabla 34. Asignación del contenido de aire atrapado _____	47
Tabla 35. Volumen de agua en l/ m ³ _____	47
Tabla 36. Selección de la relación a/c _____	48
Tabla 37. Determinación del factor para el cálculo del peso del agregado grueso _____	49
Tabla 38. Volúmenes absolutos de los materiales _____	49
Tabla 39. Pesos absolutos de los materiales _____	50
Tabla 40. Peso de material final para 1 m ³ de concreto _____	50
Tabla 41. Diseño de concreto convencional para 1m ³ , con proporción 1: 3: 2 _	51
Tabla 42. Diseño de concreto con 10% de ceniza para 1m ³ con proporción 1: 3: 2 _____	52
Tabla 43. Diseño de concreto con 15% de ceniza para 1m ³ con proporción 1: 3: 2 _____	53
Tabla 44. Diseño de concreto con 20% de ceniza para 1m ³ con proporción 1: 3: 2 _____	53
Tabla 45. Resultados del ensaye a compresión de la mezcla de concreto convencional _____	55
Tabla 46. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 10% de ceniza de madera _____	56
Tabla 47. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 15% de ceniza de madera _____	57
Tabla 48. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 20% de ceniza de madera _____	58
Tabla 49. Revenimiento de las mezclas de concreto _____	60
Tabla 50. Resultados del ensayo de temperatura de las mezclas de concreto _	61

Tabla 51. Comparación de los resultados de resistencia a compresión del concreto_____	63
Tabla 52. Cantidades de cemento por metro cubico en todas las mezclas _____	64
Tabla 53. Diseño de concreto con 10% de ceniza para 1m3 _____	78
Tabla 54. Diseño de concreto con 10% de ceniza para cinco cilindros _____	78
Tabla 55. Diseño de concreto con 15% de ceniza para 1m3 _____	79
Tabla 56. Diseño de concreto con 15% de ceniza para cinco cilindros _____	79
Tabla 57. Diseño de concreto con 20% de ceniza para 1m3 _____	80
Tabla 58. Diseño de concreto con 20% de ceniza para cinco cilindros _____	80
Tabla 59. Total de materiales para fabricar 20 cilindros de 8*4in _____	80
Tabla 60. Resumen de características de los agregados _____	81
Tabla 61. Diseño de concreto sin de ceniza para 1m3 _____	81
Tabla 62. Diseño de concreto sin de ceniza para cinco cilindros _____	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva granulométrica del agregado fino	18
Gráfico 2. Curva granulométrica del agregado grueso, huso 7	30
Gráfico 3. Consistencia normal del cemento, ensaye 1	40
Gráfico 4. Consistencia normal del cemento, ensaye 2	41
Gráfico 5. Tiempo de fraguado del cemento	43
Gráfico 6. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto convencional	55
Gráfico 7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 10% de ceniza de madera	56
Gráfico 8. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 15% de cenizas de madera	57
Gráfico 9. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 20% de cenizas de madera	58
Gráfico 10. Revenimiento de las mezclas de concreto	60
Gráfico 11. Resultados de temperatura en las mezclas de concreto	61
Gráfico 12. Resistencia a compresión del concreto	63
Gráfico 13. Consumo de cemento por cada tipo de mezcla	64

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Materiales reducidos a tamaño de muestra-----	16
Imagen 2. Determinación de la gravedad especifica y el porcentaje de absorción del agregado fino-----	22
Imagen 3. Determinación del PVSS Y PVSC en laboratorio -----	26
Imagen 4. Ensayo de impurezas orgánicas en el agregado fino -----	28
Imagen 5. Determinación del PVSS Y PVSC del agregado grueso mediante ASTM C29 -----	37
Imagen 6. Carga abrasiva aplicada -----	39
Imagen 7. Prueba de revenimiento -----	72
Imagen 8. Materiales para la fabricación del concreto -----	72
Imagen 9. Batida de mezcla-----	73
Imagen 10. Preparación de agregados para fabricación de concreto-----	73
Imagen 11. Ceniza de madera tamizada-----	74
Imagen 12. Muestra de arena reducida a tamaño de ensaye-----	74
Imagen 13. Método de la balanza hidrostática para determinar la gravedad especifica del agregado grueso -----	75
Imagen 14. Método del picnómetro para determinar la gravedad especifica del agregado fino-----	75
Imagen 15. Secado de muestras-----	76
Imagen 16. Medición de revenimiento-----	76
Imagen 17. Cilindros de concretos fabricados-----	77
Imagen 18. Curado de cilindros de concreto-----	77

Capítulo I: Generalidades

1.1 Introducción

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta el reto de responder a la creciente demanda de infraestructura sin comprometer la sostenibilidad ambiental. El uso intensivo de recursos como piedra, arena y cemento ha generado un considerable impacto sobre los ecosistemas, al mismo tiempo que ha incrementado los costos de producción, lo que convierte a este sector en uno de los principales responsables del agotamiento de recursos y de la emisión de contaminantes a nivel global.

En este sentido, distintos estudios han demostrado que el aprovechamiento de residuos agroindustriales y forestales pueden ser materiales viables que ayuden a mitigar el impacto ambiental que produce la fabricación del cemento.

El propósito de esta investigación se centra en comparar las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional frente a un concreto con cenizas de madera como material cementante complementario. La elaboración del estudio incluirá: la caracterización de los materiales utilizados, incluyendo el cemento, los agregados y las cenizas de madera; el diseño y preparación de las mezclas de concreto bajo diferentes proporciones; y finalmente, la determinación de las propiedades físicas y mecánicas, tales como resistencia a la compresión; con el fin de explorar su potencial para el desarrollo de concretos más sostenibles que mantengan los estándares de calidad que demanda el sector de la construcción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar de manera comparativa las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional de 2500 PSI frente a un concreto elaborado con cenizas de madera como material cementante complementario.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales utilizados para la fabricación de concreto según las normas de la American Society for Testing and material (ASTM).
- Diseñar mezclas de concreto con diferentes proporciones de cenizas de madera como complemento cementante y un concreto convencional de 2500 PSI.
- Comparar las propiedades físicas y mecánicas del concreto convencional y el concreto con ceniza de madera, enfocándose en la resistencia a la compresión, revenimiento y temperatura.

1.3 Justificación

El sector de la construcción es uno de los de mayor crecimiento a nivel global, y es debido a este dinamismo que resulta fundamental investigar y promover prácticas sostenibles, como el uso de subproductos de la madera, que contribuyen a reducir residuos que actualmente son difíciles de mitigar y disminuir el impacto ambiental provocado por los procesos constructivos. La incorporación de cenizas de madera como complemento cementante representa una oportunidad para dar respuesta a esta problemática, dado que se trata de un residuo abundante, accesible y de bajo costo que puede aprovecharse en la industria de la construcción.

Asimismo, la fabricación de materiales de construcción con base en cenizas de madera puede ofrecer beneficios económicos al reducir la cantidad de cemento y optimizar recursos. Farfán (2024) sostiene que *“la fabricación de nuevos materiales se da con el fin de buscar mejoras de calidad considerando siempre factores ambientales y económicos en la construcción”* (p. 18). Esto demuestra que el estudio responde a la necesidad de generar soluciones sostenibles, eficientes y económicas mediante la sustitución del 10% al 20% del cemento utilizado en mezclas de concreto convencional por ceniza de madera.

Así, la presente investigación resulta apropiada al contribuir a la sostenibilidad ambiental y a la optimización en los procesos constructivos, ofreciendo un enfoque innovador y responsable con el medio ambiente.

Capítulo II: Marco teórico

2.1 Concreto

El concreto ha sido reconocido como uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial debido a su resistencia, durabilidad y versatilidad. Su aplicación se extiende desde edificaciones residenciales hasta grandes obras de infraestructura como puentes, carreteras y presas. Según la *International Energy Agency* (2019), el concreto es el segundo material más consumido en el mundo después del agua, lo que evidencia su relevancia en el desarrollo urbano e industrial.

El concreto se define como una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados que se combinan con una pasta de cemento y agua para conformar una masa semejante a la roca. En ocasiones, se añaden aditivos para modificar características como la trabajabilidad, la durabilidad o el tiempo de endurecimiento. Como material de naturaleza pétrea, el concreto posee una elevada resistencia a la compresión y una baja resistencia a la tensión (McCormack, 2011, p. 25).

Entre los materiales alternativos para su producción, las cenizas de madera han sido objeto de estudio debido a su potencial como adición mineral en mezclas de concreto. Diversas investigaciones han evaluado su comportamiento físico y químico, así como su influencia en la resistencia a la compresión y la trabajabilidad del concreto, siguiendo lineamientos técnicos establecidos por organismos como ASTM International (Vallejos Peltroche, Pérez Villanueva, & Muñoz Pérez, 2023, p. 45–47; Chorres Majuan & Pérez Romero, 2024, p. 33).

En consecuencia, el análisis del comportamiento del concreto al incorporar cenizas de madera como sustituto parcial del cemento se presenta como una alternativa viable para evaluar su desempeño mecánico y su contribución a la sostenibilidad de los materiales de construcción.

Clasificación del concreto:

De acuerdo con Abanto Castillo (2025, p. 12–13), el concreto puede entenderse como un material compuesto elaborado a partir de la mezcla de cemento, agua, agregados finos y gruesos, además de posibles aditivos, cuya reacción química le otorga resistencia y durabilidad, convirtiéndolo en el insumo más utilizado en la construcción contemporánea.

Entre los principales tipos de concreto se destacan los siguientes:

- **Concreto convencional:** Es el tipo más común utilizado en la construcción debido a su manejabilidad y cohesión. Se compone de cemento Portland, arena, grava y agua, y se emplea en cimientos, columnas, vigas, losas y paredes (Cemex, 2018, p. 14).
- **Concreto reforzado:** Es un material compuesto que integra barras o mallas de acero en su interior, lo que le otorga una elevada capacidad para resistir esfuerzos de tracción y compresión. Gracias a esta combinación, se utiliza ampliamente en puentes, edificios de gran altura, presas y otras obras que requieren gran solidez estructural (Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2024, p. 52).
- **Concreto de alta resistencia:** Se obtiene a partir de la mezcla de cemento Portland, agua, arena, grava y aditivos que mejoran su desempeño. Debido a su elevada capacidad portante y durabilidad, resulta indispensable en estructuras sometidas a grandes esfuerzos, como puentes, presas y edificios de gran altura (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2024, pp. 37–38).
- **Concreto permeable:** Es un material que, una vez colocado, permite el paso del agua pluvial hacia el subsuelo, favoreciendo la recuperación de mantos freáticos. Se aplica en banquetas, calles de tránsito ligero y estacionamientos a cielo abierto (Concrelab, 2023, p. 21).

- **Concreto liviano:** Se caracteriza por su menor densidad en comparación con el concreto convencional, gracias al uso de agregados especiales como piedra pómez, arcilla expandida o cenizas. Esta propiedad lo convierte en un material adecuado para elementos estructurales y no estructurales que requieren aligerar cargas, como muros, techos y losas (Asociación Española de Hormigón y Cemento, 2024, p. 67).

2.2 Materiales que conforman el concreto

El concreto es una mezcla compuesta de agregados, material cementante, agua, aire y, en ocasiones, aditivos. En estado fresco o plástico, puede adoptar cualquier forma, mientras que en estado endurecido adquiere la capacidad de resistir esfuerzos mecánicos y mantener su durabilidad frente a diversas acciones externas.

Según *Domat Concrete Machinery* (2025, pp. 18–19), el concreto está conformado por los siguientes componentes principales:

- **Cemento:** actúa como aglutinante, uniendo todos los materiales de la mezcla.
- **Agregados finos y gruesos:** proporcionan volumen y resistencia a la mezcla.
- **Agua:** activa la reacción química del cemento (hidratación), permitiendo el endurecimiento del concreto.
- **Aditivos:** se incorporan para mejorar propiedades específicas como la trabajabilidad, el tiempo de fraguado o la resistencia al agua.

2.2.1 Cemento

El cemento se define como un conglomerante hidráulico que, al ser amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece debido a las reacciones de hidratación de sus constituyentes, generando productos mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo agua (Sánchez, 2021, p. 45).

Tipos de cemento

La norma **ASTM C1157** establece seis tipos de cementos hidráulicos:

- **Tipo GU:** Uso general.
- **Tipo HE:** Alta resistencia inicial.
- **Tipo MS:** Moderada resistencia a los sulfatos.
- **Tipo HS:** Alta resistencia a los sulfatos.
- **Tipo MH:** Moderado calor de hidratación.
- **Tipo LH:** Bajo calor de hidratación (ASTM C1157, 2020, pp. 12–14).

Propiedades del cemento

El cemento es considerado uno de los materiales más importantes en la construcción debido a sus múltiples propiedades que garantizan la estabilidad y durabilidad de las estructuras. Entre ellas, destaca su resistencia a la compresión, que le permite soportar grandes cargas sin deformarse (Neville, 2022, p. 89). Asimismo, su capacidad de adherencia facilita la unión eficaz con agregados como arena y grava, formando concretos de alta cohesión (Hewlett, 2024, p. 73).

Otra característica fundamental es su durabilidad, ya que mantiene sus propiedades frente al paso del tiempo y condiciones ambientales adversas. El proceso de hidratación del clinker con el agua genera compuestos que le otorgan dureza y estabilidad química, asegurando su desempeño a largo plazo (Hewlett, 2024, p. 74–75). Finalmente, su versatilidad lo convierte en un material adaptable a diferentes aplicaciones, desde edificaciones hasta obras de infraestructura vial.

Además, es necesario conocer el volumen que ocupa una masa determinada de cemento dentro de un metro cúbico de concreto. El método más común para determinar la densidad del cemento es el de Le Chatelier, descrito en la norma ASTM C188 (Sánchez, 2021, p. 46; ASTM C188, 2018, p. 3–5).

Y finalmente, los tiempos de fraguado que se ven afectados por la composición química del cemento, su fineza, el agua de amasado y la temperatura ambiente. Estos tiempos se determinan mediante el ensayo descrito en la norma ASTM C191, que evalúa el cambio del estado plástico al estado endurecido de la pasta de cemento (ASTM C191, 2018, pp. 6–8).

2.2.2 Agua

El agua es un elemento indispensable en las mezclas de concreto, ya que debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C1602, la cual establece que se utilice agua potable libre de impurezas. Al reaccionar con el cemento, el agua inicia el proceso de hidratación que permite el fraguado y endurecimiento de la mezcla. Además, facilita la unión entre las partículas de cemento y los agregados, garantizando cohesión y trabajabilidad en estado fresco.

La calidad del agua resulta determinante, pues la presencia de impurezas puede alterar los tiempos de fraguado, disminuir la resistencia del concreto, ocasionar manchas en la superficie e incluso favorecer la corrosión del refuerzo metálico (ASOCRETO, 2020, p. 27).

2.2.3 Agregados

Según Sánchez de Guzmán (2021, p. 58), los agregados son materiales pétreos de origen natural o artificial que, al combinarse con el cemento y el agua, constituyen el volumen principal del concreto y determinan en gran medida sus propiedades mecánicas. Esta definición permite comprender que los agregados no son un simple relleno, sino un componente esencial que aporta resistencia, estabilidad y economía a las mezclas de construcción.

Clasificación de los agregados

- **Agregados finos:** Son partículas naturales o manufacturadas con tamaño menor a 4.75 mm (malla No. 4 ASTM). Incluyen arenas de río, arenas trituradas y arenas manufacturadas. Su función principal es llenar los vacíos entre los agregados gruesos y mejorar la trabajabilidad del concreto (Guía de agregados para construcción, 2023, p. 19).
- **Agregados gruesos:** Son partículas con tamaño mayor a 4.75 mm, que pueden llegar hasta 75 mm según la aplicación. Incluyen grava natural, piedra triturada y áridos reciclados, aportando resistencia y estabilidad a la mezcla (SonProject Ingeniería Civil, 2024, p. 41).

Los agregados representan entre el 60–85 % del volumen del concreto, y su correcta selección determina la resistencia, durabilidad y economía de las estructuras (SonProject Ingeniería Civil, 2024, p. 42; Guía de agregados para construcción, 2023, p. 20).

Caracterización de los agregados

Los agregados deben cumplir con estándares de limpieza, resistencia y durabilidad, además de estar libres de sustancias que puedan afectar la mezcla. Su caracterización se realiza considerando los siguientes parámetros:

- **Contenido de humedad:** Corresponde al agua total presente en los agregados, tanto la absorbida en sus poros internos como la retenida en su superficie. Este parámetro influye directamente en la relación agua/cemento y, por ende, en la resistencia y durabilidad del concreto. Normas técnicas como la ASTM C566 establecen la importancia de su determinación precisa para ajustar la dosificación de agua (ASTM C566, 2013, pp. 2–4).
- **Absorción:** Se define como la capacidad de los agregados para retener agua en sus poros internos. Un agregado con alta absorción puede modificar la relación agua/cemento, afectando la resistencia y durabilidad del concreto (ASTM C127, 2015, p. 3–5; ASTM C128, 2015, p. 4–6).

- **Gravedad específica:** Es la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua a 4 °C. Se expresa como un valor adimensional y permite calcular el peso unitario y la proporción de materiales en la mezcla. La ASTM C127 y la ASTM C128 establecen los procedimientos para su determinación en condiciones seca al horno, saturada-superficie-seca y aparente (ASTM C127, 2015, pp. 6–8; ASTM C128, 2015, pp. 7–9).
- **Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS):** Corresponde al peso por unidad de volumen de los agregados en condición seca y suelta, sin compactación. Este parámetro refleja la densidad aparente mínima y se utiliza para evaluar la trabajabilidad y el grado de compactación potencial en el concreto. La ASTM C29/C29M-17a describe el procedimiento para su determinación (ASTM C29/C29M, 2017, pp. 3–5).
- **Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC):** Se refiere al peso por unidad de volumen de los agregados en condición seca y compactada, cuando las partículas se acomodan mediante vibración o apisonamiento. Este valor permite estimar la densidad aparente máxima que puede alcanzar un agregado en obra (ASTM C29/C29M, 2017, pp. 6–7).
- **Porcentaje de vacíos:** Representa la proporción de espacios no ocupados por partículas sólidas dentro de un volumen de agregados. Se calcula a partir de la diferencia entre el peso volumétrico y la gravedad específica del material. Un alto porcentaje de vacíos implica mayor necesidad de pasta de cemento para llenar los espacios, afectando la economía y resistencia del concreto (ASTM C29/C29M, 2017, p. 8).

2.3 Complementos cementantes

2.3.1 Cenizas de madera

Las cenizas de madera son un subproducto de la combustión de residuos lignocelulósicos, principalmente generados en procesos industriales o domésticos. Su composición incluye óxidos y sales minerales como calcio, potasio, magnesio y sílice, lo que les confiere propiedades puzolánicas bajo determinadas condiciones. Debido a su origen natural, se consideran un material alternativo aprovechable en la construcción dentro de un enfoque de sostenibilidad y economía circular, dado que, en promedio, entre un 6–10 % del peso de la madera quemada se convierte en ceniza (Sánchez, 2022, p. 64).

El empleo de cenizas de madera ha permitido sustituir parcialmente componentes del concreto, aportando ventajas como menor contaminación y accesibilidad. Su incorporación contribuye a la sustentabilidad de las estructuras, reduce costos de construcción y disminuye las emisiones de CO₂, lo que mitiga el impacto ambiental negativo asociado a la producción de cemento (Vallejos Peltroche, 2023, p. 45–46).

La fabricación de nuevos materiales busca mejorar la calidad de las construcciones considerando factores ambientales y económicos. En este sentido, la sustitución parcial de materiales convencionales por cenizas de madera ha demostrado favorecer las propiedades físico-mecánicas del concreto, consolidándose como una alternativa positiva para optimizar recursos y reducir el consumo de cemento durante el proceso de producción.

Caracterización de las cenizas de madera

Existen dos tipos principales de cenizas generadas en la combustión de la madera:

- **Ceniza residual:** se deposita en la base del incinerador.
- **Ceniza volante:** se libera a la atmósfera en forma de material particulado.

Disminución de los problemas ambientales

La incorporación de cenizas de madera en mezclas de concreto representa una opción económica y factible, capaz de reducir el consumo de cemento y, en consecuencia, las emisiones de CO₂ asociadas a su producción. El aprovechamiento de residuos de biomasa se consolida, así como una estrategia respetuosa con el medio ambiente y alineada con los objetivos de sostenibilidad en la construcción (Vallejos Peltroche, 2023, pp. 47–48).

Composición química de los desperdicios de la madera

La madera se caracteriza por su elevada relación resistencia-peso, facilidad de trabajo con herramientas simples, resistencia frente a ácidos débiles y capacidad de aislamiento térmico y eléctrico. Estas propiedades la convierten en un material versátil y útil en procesos industriales y en la construcción. Además, como recurso renovable, refuerza su valor dentro de un enfoque de sostenibilidad y aprovechamiento responsable de los recursos naturales (Sánchez, 2022, p. 62–65).

Tabla 1. Porcentaje óptimo de quemado de madera

Referencias	% De cenizas de reemplazo	Temp. De calcinado del RHA
(34)	N/D	450 - 900 °C
(35)	N/D	500 - 700 °C
(36)	15% - 30%	600 °C
(40)	N/D	700 °C
(41)	N/D	500 - 700 °C

Fuente: Mehta, (1992). Materiales suplementarios únicos para el cemento

Resistencia a la humedad

La resistencia a la humedad en la madera corresponde al agua que forma parte de los compuestos químicos de su estructura interna. Por ello, no puede eliminarse sin alterar o destruir el propio material, como ocurre en procesos extremos de combustión. Esta característica explica la estabilidad de la madera frente a condiciones ambientales y su comportamiento particular en aplicaciones industriales y constructivas (Sánchez, 2022, p. 64).

Resistencia al calor y al fuego

La madera presenta una notable estabilidad frente a las temperaturas ordinarias. La pérdida de peso que experimenta no depende únicamente de la temperatura aplicada, sino también del tiempo de exposición al calentamiento. Sus componentes químicos se descomponen a diferentes velocidades: la hemicelulosa se degrada con mayor rapidez que la celulosa, mientras que la lignina permanece más resistente. Como consecuencia, la madera sometida a calor prolongado se enriquece en lignina, adquiere una estructura más porosa, disminuye su densidad y se inflama con mayor facilidad conforme avanza el proceso de descomposición térmica. Por ello, la temperatura de ignición de la madera no es constante, sino que varía en función del tiempo de calentamiento (Sánchez, 2022, p. 65–66).

Composición de la madera

En términos generales, la composición media de la madera se distribuye en un 50 % de carbono (C), un 42 % de oxígeno (O), un 6 % de hidrógeno (H) y un 2 % de nitrógeno (N) y otros elementos menores. Esta proporción explica su comportamiento físico-químico y su versatilidad como recurso renovable en la industria de la construcción y en aplicaciones industriales (Sánchez, 2022, p. 67).

2.3.2 Propiedades mecánicas y químicas de la ceniza de madera

La madera se caracteriza por ser un material fuerte, capaz de trabajarse con herramientas sencillas y de ofrecer resistencia frente a ácidos débiles. Asimismo, constituye un buen aislante térmico y eléctrico.

Como materia prima química, la madera puede transformarse en diversos productos derivados, ampliando su campo de aplicación en distintos sectores. A diferencia de la mayoría de las materias primas convencionales, la madera es un recurso renovable, lo que refuerza su valor dentro de un enfoque de sostenibilidad y aprovechamiento responsable de los recursos naturales (Sánchez, 2022, p. 62–63).

2.4 Ensayos del concreto

2.4.1 Ensayos al concreto en estado fresco

- **Temperatura**

El ensayo de temperatura permite conocer el valor térmico de una mezcla de concreto fresco y está regulado por la norma ASTM C1064. De la temperatura dependen propiedades como el tiempo de fraguado, la trabajabilidad y la resistencia. El procedimiento se realiza introduciendo un termómetro a una profundidad de 75 mm (3") dentro de la mezcla, utilizando un recipiente de material no absorbente. La prueba puede tomar varios minutos, dependiendo del tamaño de los agregados (ASTM International, 2018, p. 3–5).

- **Revenimiento**

El ensayo de revenimiento se aplica al concreto fresco para determinar su consistencia, siguiendo la norma ASTM C143. Este ensayo es determinante para la aceptación de la mezcla y se limita a valores de asentamiento entre 25 y 175 mm (1"–7"), con agregados gruesos de tamaño no mayor a 50 mm (2"). Una mezcla con revenimiento entre 0 y 25 mm presenta baja trabajabilidad, mientras que valores cercanos a 175 mm indican alta trabajabilidad, no recomendable para procesos de vibración. Para fundaciones y zapatas, un revenimiento de 26–50 mm es aceptable sin vibración, y con vibración se permite entre 40 y 115 mm (ASTM International, 2018, p. 4–7).

- **Peso unitario**

El ensayo para determinar el peso unitario del concreto está descrito en la norma ASTM C138. Este procedimiento permite verificar que la mezcla tenga la dosificación adecuada y que no existan problemas como exceso de aire o segregación. Su importancia radica en que un concreto con el peso unitario correcto garantiza la densidad y, en consecuencia, la resistencia esperada para que la estructura cumpla con los esfuerzos para los que fue diseñada (ASTM International, 2018, p. 6–9).

2.4.2 Ensayos del concreto en estado endurecido

- **Resistencia a la compresión**

Las pruebas de resistencia a la compresión se emplean principalmente para verificar que la mezcla de concreto cumpla con los requerimientos de diseño estructural. Este ensayo está definido en la norma ASTM C39, la cual establece el procedimiento para aplicar una carga axial creciente sobre especímenes cilíndricos de concreto hasta su falla. Los resultados obtenidos permiten evaluar la calidad del material, estimar su resistencia en estructuras y servir como criterio de aceptación o rechazo de lotes de producción (ASTM International, 2018, p. 4–7).

Capítulo III: Análisis e interpretación de resultados

En este apartado se presenta el análisis e interpretación de los resultados obtenidos a partir de la caracterización de los materiales empleados en la elaboración del concreto. Se incluyen tanto los agregados finos y gruesos como el material cementante incorporado.

Las propiedades físicas y mecánicas fueron determinadas mediante ensayos de laboratorio, siguiendo las normativas ASTM con el objetivo de evaluar su incidencia en el desempeño y comportamiento del concreto.

3.1 Reducción de muestras de agregados finos y gruesos a tamaños de ensayo ASTM C 702

El muestreo de los agregados empleados en las mezclas se llevó a cabo conforme al procedimiento establecido en la norma ASTM D-75, específicamente para la obtención de muestras provenientes de pilas de acopio.

Posteriormente, una vez recolectadas, las muestras de agregados fueron reducidas hasta alcanzar el tamaño requerido para la ejecución de los ensayos de laboratorio, utilizando el método de cuarteo mecánico según lo indicado en la norma ASTM C-702. De esta manera, se garantizó la representatividad y adecuación del material.

Imagen 1. Materiales reducidos a tamaño de muestra



Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización del agregado fino

La arena caracterizada corresponde a un agregado fino de origen natural, que presenta una textura granular. Sus propiedades físicas se detallan a continuación:

3.2.1 Determinación del análisis granulométrico del agregado fino ASTM C33

Se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado fino, con el propósito de conocer la distribución de tamaños de sus partículas, así como su Módulo de Finura.

Tabla 2. Granulometría del agregado fino

Tamiz	Peso retenido parcial (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	0	0	0	100
No.4	0	0	0	100
No.8	81.2	25	25	75
No.16	72	22	46	54
No.30	55	17	63	37
No.50	47	14	77	23
No.100	41	12	89	10
No. 200	28	10	100	0
Total	324.2	100	-	-

Fuente: Elaboración propia

- Cálculo del módulo de finura

Ecuación:

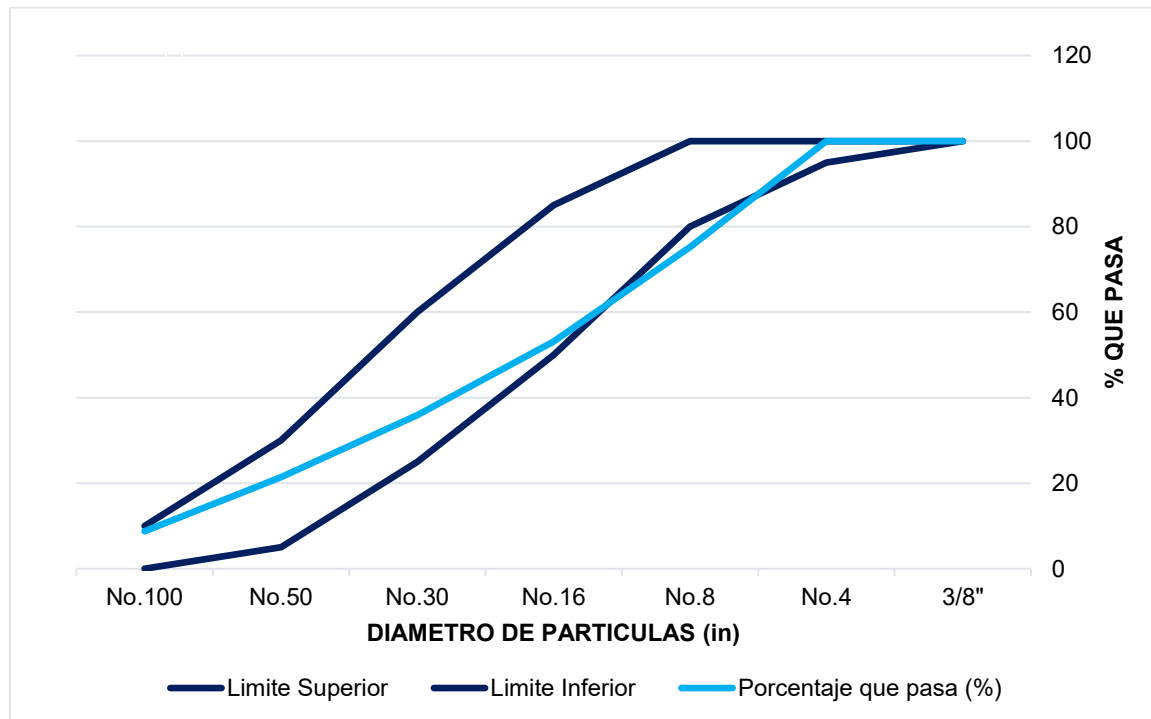
$$MF = \frac{\Sigma \%RA \text{ (desde } 3/8 \text{ hasta } \#100)}{100} = \frac{300.3}{100} = 3.003$$

Donde:

MF: módulo de finura

%Ra: porcentaje retenido acumulado

Gráfico 1. Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

La curva granulométrica del agregado fino se mantiene en gran parte dentro de los límites establecidos por la ASTM C33, lo que confirma que el material es adecuado para su uso en concreto. Sin embargo, se observa que en ciertos tamices la línea se desvía ligeramente de los rangos normativos, mostrando una mayor concentración de partículas en esas fracciones.

Este detalle, aunque no invalida el material, sí puede afectar la trabajabilidad y la cohesión de la mezcla, por lo que conviene ajustar la dosificación y controlar la relación agua/cemento para evitar problemas de vacíos o exceso de pasta. En síntesis, el agregado es aceptable, pero requiere atención en su manejo para asegurar un buen desempeño del concreto. Además, de acuerdo a estos resultados, se evidencia que el agregado fino presenta un módulo de finura de 3.003, lo que clasifica a la arena como gruesa y el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 es de 1.2%, lo cual indica una baja presencia de finos.

3.2.2 Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino ASTM C128

Estos parámetros constituyen indicadores fundamentales para evaluar la calidad del material, ya que permiten determinar su comportamiento frente al agua y su influencia en la mezcla de concreto. A continuación, se presentan las fórmulas para obtener los resultados trabajados por el método gravimétrico.

- Cálculo de la gravedad específica del agregado fino

Ecuación:

$$GE = \frac{A}{D + B - C}$$

Donde:

A: Peso del material seco

B: Peso del material SSS

C: Peso del picnómetro con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración

D: Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración.

- Cálculo de la gravedad específica aparente del agregado fino

Ecuación:

$$GE_{ap} = \frac{B}{D + A + C}$$

Donde:

A: Peso del material seco

B: Peso del material SSS

C: Peso del picnómetro con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración

D: Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración.

- Cálculo de la gravedad específica saturada superficialmente seca del agregado fino

Ecuación:

$$GE_{ss} = \frac{B}{D + B - C}$$

Donde:

B: Peso del material SSS

C: Peso del picnómetro con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración

D: Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración.

- Cálculo del porcentaje de absorción del agregado fino

Ecuación:

$$\%Abs = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso del material seco

B: Peso del material SSS

Tabla 3. Ensayes para obtener gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino

Datos recopilados			
Descripción	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Frasco n°	P	P	P
WArenaSSS (B)	502	506.3	510.5
WFrasco+Arena+w (C)	978.4	971	964
WFrasco+w (D)	682.787	682.741	682.695
Temperatura de ensaye	29.5	29.9	33.9
Codigo de tara	KA-2	LSM-02	LSM-04
Wtara	158	164.1	170.2
WArenaSeca+tara	639.2	639.3	639.3
WArenaSeca (A)	481.2	475.2	469.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado fino

Características	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado
Gravedad específica (Gss)	2.33	2.18	2.26
Gravedad específica SSS (Gssss)	2.43	2.32	2.38
Gravedad específica aparente (Ga)	2.59	2.54	2.57
Porcentaje de absorción	4.32	6.54	5.43

Fuente: Elaboración propia

El agregado fino evaluado presenta una gravedad específica promedio de 2.26, valor que lo clasifica como un material relativamente ligero y con mayor presencia de poros. Esta condición se refleja en un porcentaje de absorción de 5.43 %, el cual supera los rangos comúnmente aceptados por la ASTM C128 para agregados finos, donde valores elevados se asocian con materiales altamente absorbentes. Tal comportamiento implica que el agregado puede retener cantidades significativas de agua, lo que exige un control más riguroso en el diseño de mezcla para evitar desequilibrios en la relación agua/cemento.

En términos prácticos, esta característica puede afectar la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto, por lo que resulta indispensable ajustar la dosificación.

Imagen 2. Determinación de la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Determinación de los pesos volumétricos seco suelto y seco compacto del agregado fino ASTM C29

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el peso volumétrico seco compacto (PVSC) del agregado fino que permiten evaluar la densidad del material en condiciones de almacenamiento y compactación.

- Cálculo de PVSS

Ecuación:

$$PVSS = \frac{W_s}{Volm}$$

Donde:

PVSS: Peso volumétrico seco suelto

Ws: Peso del material seco suelto contenido en el recipiente

Volm: Volumen del recipiente

- Cálculo del material seco contenido en el recipiente

Ecuación:

$$W_s = (W_m + W_{mat}) - W_m$$

Donde:

Ws: Peso del material seco contenido en el recipiente

Wm + Wmat: Peso del molde más material seco

Wm: Peso del molde

Tabla 5. Cálculo de PVSS del agregado fino, ensaye 1

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del Molde gr	2664.89
W Molde Kg	1696
W del molde + material gr	5668
W del agregado suelto en el molde gr	3972
PVSS1	1.49 gr/cm ³
	1490.50 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Cálculo del PVSS del agregado fino, ensaye 2

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del molde gr	2664.89
W molde Kg	1696
W del molde + material gr	5670
W del agregado suelto en el molde gr	3974
PVSS2	1.49 gr/cm ³
	1491.25 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Cálculo del PVSS del agregado fino, ensaye 3

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del molde	2664.89
W molde Kg	1696.00
W del molde + material	5958.00
W del agregado compacto en el molde	4262.00
PVSS3	1.60 g/cm ³
	1599.32 kg/m ³
% Vacíos	29.09

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados de los PVSS del agregado fino

PVSS (kg/m ³)	Ensaye 1	Ensaye 2	Ensaye 3	Promedio
	1490.50	1491.25	1490.82	1490.87

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 1

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del molde	2664.89
W molde	1696.00
W del molde + material	5880.00
W del agregado compacto en el molde	4184.00
PVSC1	1.57 g/cm ³
	1570.05 kg/m ³
%Vacíos	30.39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 2

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del molde	2664.89
W molde Kg	1696.00
W del molde + material	5919.00
W del agregado compacto en el molde	4223.00
PVSC2	1.58 g/cm ³
	1584.68 kg/m ³
% Vacíos	29.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Cálculo del PVSC del agregado fino, ensaye 3

Datos recopilados	
Arena	
Volumen del molde	2664.89
W molde Kg	1696.00
W del molde + material	5958.00
W del agregado compacto en el molde	4262.00
PVSC3	1.60 g/cm ³
	1599.32 kg/m ³
% Vacíos	29.09

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Resultados de los PVSC del agregado fino

PVSC (kg/m ³)	Ensaye 1	Ensaye 2	Ensaye 3	Promedio
	1570.05	1584.68	1599.32	1584.58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resultados de los Porcentajes de vacíos del agregado fino

Porcentaje de vacíos (%)	Ensaye 1	Ensaye 2	Ensaye 3	Promedio
	30.07	29.74	29.09	29.63

Fuente: Elaboración propia

El agregado fino presenta un PVSS de 1490.87 kg/m³ y un PVSC de 1584.58 kg/m³, valores dentro del rango típico de 1200–1760 kg/m³ establecido por la ASTM C29/C29M (2020). El porcentaje de vacíos de 29.63% también se ubica en el intervalo esperado de 25–35 %, confirmando la conformidad del material con la norma.

Imagen 3. Determinación del PVSS Y PVSC en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Determinación del contenido de humedad del agregado fino ASTM C566

Se presentan los valores de contenido de humedad del agregado fino, parámetro fundamental para evaluar la cantidad de agua retenida en el material.

Tabla 14. Contenido de humedad del agregado fino

Contenido de humedad del agregado fino	
Peso húmedo (gr)	716
Peso seco (gr)	656.5
Contenido de humedad (%)	7.31

Fuente: Elaboración propia

El agregado fino presentó un contenido de humedad de 7.31 %, valor superior al rango típico de 2–3 % establecido en la ASTM C566 para agregados naturales. Este resultado indica una mayor retención de agua en el material, lo que requiere ajustes en la dosificación para garantizar la adecuada relación agua-cemento en el diseño de mezclas de concreto.

3.2.5 Determinación de las impurezas orgánicas en el agregado fino ASTM C40

El ensayo consiste en mezclar una muestra de arena con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y observar el color resultante después de un tiempo determinado.

El color de la arena en la prueba ASTM C 40 es un criterio práctico para decidir su aceptación o rechazo, ayudando a prevenir problemas estructurales derivados de la presencia de materiales orgánicos nocivos.

Tabla 15. *Uso del agregado fino según contenido de impurezas orgánicas*

Color	Utilización	Disminución de la resistencia del mortero y del concreto de 7 a 28 días de edad
Incoloro o amarillo claro	Concreto de buena calidad	0
Azafranado	Utilizable	10% a 15%
Rojo amarillento	Concreto sometidos a tensiones reducidas	15 a 25%
Castaño marrón	No utilizable	25 a 50%
Marrón oscuro	No utilizable	50% a 100%

Fuente: Elaboración propia

Imagen 4. Ensayo de impurezas orgánicas en el agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que la coloración del material (amarillo claro). Según la tabla de referencia, esta característica está asociada a la ausencia de materia orgánica perjudicial, lo que explica que no exista disminución en la resistencia del mortero y del concreto entre los 7 y 28 días de edad.

Esto sugiere que el material no interfiere en el proceso de hidratación del cemento ni afecta el desarrollo de sus propiedades mecánicas. En comparación con agregados de tonalidades más oscuras (como castaño o marrón), que presentan reducciones significativas de resistencia, el agregado analizado ofrece un comportamiento óptimo y estable.

El material cumple con los requisitos necesarios para ser utilizado en la elaboración de concreto y mortero de buena calidad, asegurando durabilidad y desempeño estructural adecuado.

3.3 Caracterización del agregado grueso

La grava caracterizada en cuestión, corresponde a una con granos angulares obtenida por trituración mecánica. A continuación, se detallan sus propiedades físicas según ASTM C33:

3.3.1 Determinación del análisis granulométrico del agregado grueso ASTM C136

La grava caracterizada en cuestión corresponde a una muestra con granos angulares obtenida por trituración mecánica. A continuación, se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado grueso, con el propósito de conocer la distribución de tamaños de sus partículas, así como el tamaño máximo (TM) y su tamaño máximo nominal (TMN).

- Cálculo de los pesos retenidos parciales

Ecuación:

$$\%RP = \frac{\text{Peso retenido en cada tamíz}}{\text{Peso seco total}} * 100$$

- Cálculo de los pesos retenidos acumulados

Ecuación:

$$\%RA = \%RA_i + \%RP_{i+1}$$

Donde:

%Ra= Porcentaje retenido acumulado

%Rai = Porcentaje retenido acumulado inicial

%RP i+1: Porcentaje retenido parcial siguiente al acumulado que se está calculando

- Cálculo de porcentajes que pasan

Ecuación:

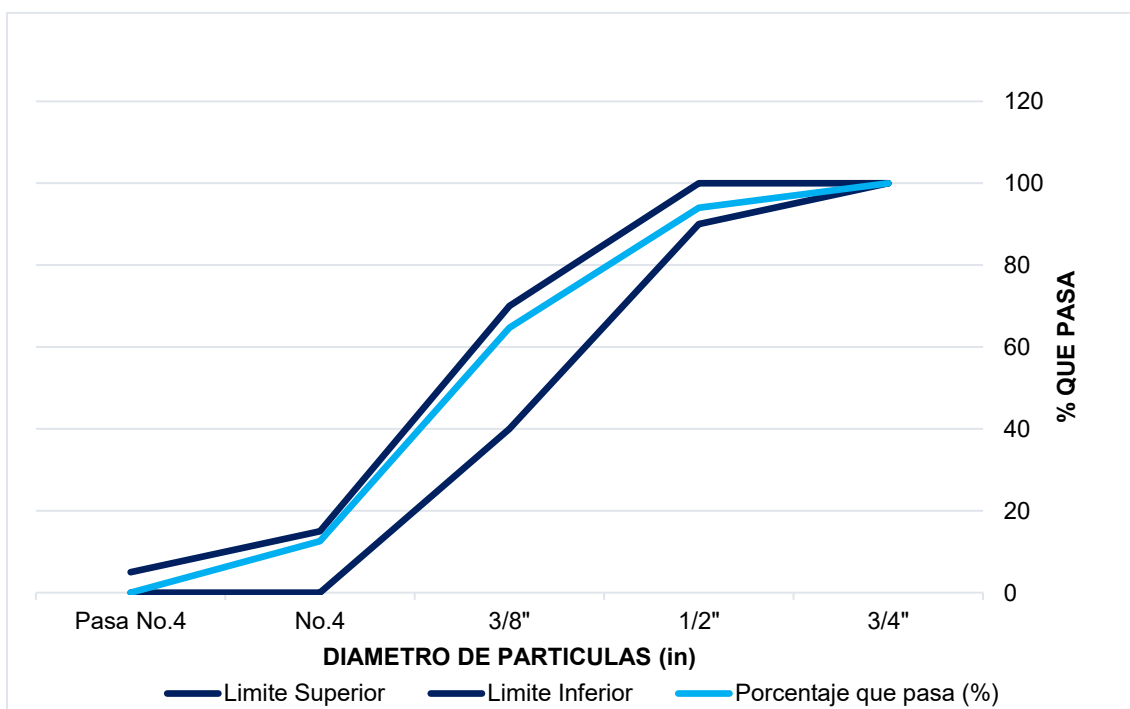
$$\% \text{ que pasan} = 100 - \%RA$$

Tabla 16. Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Peso retenido parcial (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/4"	0	0	0	100
1/2"	112.1	6	6	94
3/8"	659.6	35	35	65
No.4	974.4	52	87	13
Pasa No.4	234.4	13	100	0
Total	1868.4	100	-	-
TM	3/4"			
TMN	1/2"			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2. Curva granulométrica del agregado grueso, huso 7



Fuente: Elaboración propia

El análisis granulométrico del agregado grueso mostró que la mayor fracción de partículas se retuvo en los tamices de 3/8" y No. 4, con porcentajes parciales de 35 % y 52 %, y acumulados de 41 % y 93 %, respectivamente. A partir de estos resultados se determinó un tamaño máximo de 3/4" y un tamaño máximo nominal de 1/2", lo que confirma que la distribución corresponde a una grava de clasificación media y de graduación continua.

El agregado grueso utilizado fue adquirido comercialmente como grava de 3/8", material que suele someterse a procesos de selección granulométrica para limitar la presencia de sobre tamaños. En consecuencia, el 100 % del material pasó libremente por el tamiz de 3/4", mientras que en el tamiz de 1/2" se registró una fracción retenida inicial del 6 %. Dado que el tamiz de 1/2" es la menor abertura por la cual permite el paso de la mayor parte de la muestra (94 %), este se define técnicamente como el tamaño máximo nominal del agregado, justificando la secuencia lógica de los parámetros obtenidos.

Esta característica refleja una granulometría bien graduada y uniforme, que favorece el acomodo de las partículas, reduce el porcentaje de vacíos y optimiza la demanda de pasta de cemento en la elaboración de mezclas de concreto. Además, la curva granulométrica obtenida se mantuvo dentro de los límites superiores e inferiores establecidos por la norma ASTM C33 (Huso 7), garantizando que el material cumple con los requisitos de gradación para agregados destinados a concreto estructural. En consecuencia, el agregado analizado puede considerarse apto para su incorporación en mezclas, aportando estabilidad, consistencia y un óptimo desempeño mecánico al concreto.

3.3.2 Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso ASTM C127

Los parámetros obtenidos son indicadores clave para evaluar la calidad del agregado, al evidenciar su comportamiento frente al agua y el efecto que ejerce en la mezcla de concreto. Los resultados se determinaron mediante el método de la balanza hidrostática.

- Cálculo de la gravedad específica del agregado grueso

Ecuación:

$$GE = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A: Peso seco

B: Peso material SSS

C: Peso del material sumergido

- Cálculo de la gravedad específica del agregado grueso

Ecuación:

$$GE_{ap} = \frac{B}{A - C}$$

Donde:

A: Peso seco

B: Peso material SSS

C: Peso del material sumergido

- Cálculo de la gravedad específica saturada superficialmente seca del agregado grueso

Ecuación:

$$GE_{SSS} = \frac{B}{B - C}$$

Donde:

B: Peso material SSS

C: Peso del material sumergido

- Cálculo del porcentaje de absorción del agregado grueso

Ecuación:

$$\%Abs = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso seco

B: Peso material SSS

Tabla 17. Resultados de gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso

Característica	Ensayo 1	Ensayo 2	Resultado
Gravedad específica (Gss)	2.67	2.65	2.66
Gravedad específica SSS (Gesss)	2.75	2.70	2.72
Gravedad específica aparente (Ga)	2.86	2.85	2.86
Porcentaje de absorción	2.40	2.42	2.41

Fuente: Elaboración propia

El agregado grueso analizado presenta una gravedad específica promedio de 2.66. El porcentaje de absorción obtenido fue de 2.41 %, valor inferior al límite máximo de 3% establecido por la ASTM C127-15, lo que confirma que el material cumple con los parámetros normativos. Estos resultados evidencian que la grava triturada posee una densidad adecuada y una porosidad moderada.

3.3.3 Determinación de los pesos volumétricos seco suelto y seco compacto del agregado grueso ASTM C29

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el peso volumétrico seco compacto (PVSC) del agregado grueso, parámetros que permiten valorar la densidad del material tanto en condiciones de almacenamiento como bajo procesos de compactación.

- Cálculo de PVSS:

Ecuación:

$$PVSS = \frac{W_s}{Vol}$$

Donde:

PVSS: Peso volumétrico seco suelto

Ws: Peso del material seco suelto contenido en el recipiente

Vol: Volumen del recipiente

- Cálculo del material seco contenido en el recipiente

Ecuación:

$$W_s = (W_m + W_{mat}) - W_m$$

Donde:

Ws: Peso del material seco contenido en el recipiente

Wm + Wmat: Peso del molde más material seco

Wm: Peso del molde

Tabla 18. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 1

Datos recopilados		
Grava		Unidad
Volumen del molde	6937.95	cm ³
W molde	3745.00	gr
W del molde + material	13083.00	gr
W del agregado suelto en el molde	9338.00	gr
PVSS1	1.35	gr/cm ³
	1345.93	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 2

Datos recopilados		
Grava		Unidad
Volumen del molde	6937.95	cm ³
W molde	3745.00	gr
W del molde + material	12971.00	gr
W del agregado suelto en el molde	9226.00	gr
PVSS2	1.33	gr/cm ³
	1329.79	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Cálculo del PVSS del agregado grueso, ensaye 3

Datos recopilados		
Grava		Unidad
Volumen del molde	6937.95	cm ³
W molde	3745.00	gr
W del molde + material	12859.00	gr
W del agregado suelto en el molde	9114.00	gr
PVSS3	1.31	gr/cm ³
	1313.64	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resultados de los PVSS del agregado grueso

PVSS (kg/m ³)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
	1345.93	1329.79	1313.64	1329.79

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 1

Datos recopilados	
Grava	
Volumen del molde	6937.95
W molde Kg	3745.00
W del molde + material	13482.00
W del agregado compacto en el molde	9737.00
PVSC1	1.40 g/cm ³
	1403.44 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 2

Datos recopilados	
Grava	
Volumen del molde	6937.95
W molde Kg	3745.00
W del molde + material	13356.00
W del agregado compacto en el molde	9611.00
PVSC2	1.39 g/cm ³
	1386.28 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Cálculo del PVSC del agregado grueso, ensaye 3

Datos recopilados	
Grava	
Volumen del molde	6937.95
W molde Kg	3745.00
W del molde + material	13356.00
W del agregado compacto en el molde	9611.00
PVSC3	1.39 g/cm ³
	1385.28 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Resultado de los PVSC del agregado grueso

PVSC (kg/m ³)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
	1403.44	1386.36	1385.28	1391.69

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Resultado de los Porcentajes de vacíos agregado grueso

Porcentaje de vacíos (%)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
	47.50	47.84	48.18	47.84

Fuente: Elaboración propia

El agregado grueso presenta un PVSS promedio de 1329.79 kg/m³ y un PVSC promedio de 1391.69 kg/m³, valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos por la ASTM C29 para agregados gruesos.

El porcentaje de vacíos obtenido (47.84 %) también se ubica dentro del intervalo normativo de 30–50 %, confirmando que el material cumple con los parámetros de densidad y vacíos requeridos.

Imagen 5. Determinación del PVSS Y PVSC del agregado grueso mediante ASTM C29



Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Determinación del contenido de humedad del agregado grueso ASTM C566

Se presentan los valores de contenido de humedad del agregado grueso, parámetro fundamental para evaluar la cantidad de agua retenida en el material.

Tabla 27. *Contenido de humedad del agregado grueso*

Contenido de humedad del agregado grueso	
Peso húmedo (gr)	1660
Peso seco (gr)	1657.3
Contenido de humedad (%)	0.148

Fuente: Elaboración propia

El agregado grueso presenta un contenido de humedad de 0.148 %. Este valor se encuentra dentro de los rangos aceptables establecidos por la ASTM C566, que considera adecuados los contenidos de humedad bajos en agregados gruesos, ya que no afectan de manera significativa la relación agua-cemento en el diseño de mezclas.

3.3.5 Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso ASTM C131/C131M

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la determinación de la resistencia al desgaste por cargas abrasivas en los agregados utilizados.

El ensayo se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por la ASTM C131/C131M, norma que regula la evaluación de la durabilidad de los agregados frente a la acción mecánica de cargas abrasivas en el tambor de Los Ángeles.

El objetivo principal de esta prueba es cuantificar la pérdida de masa de los materiales sometidos a impactos y fricción, con el fin de valorar su comportamiento frente al desgaste y su influencia en la resistencia y durabilidad del concreto.

- Cálculo del porcentaje de desgaste

Ecuación:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{P_1}{P_2} * 100$$

Donde:

P1: Peso de la muestra seca antes del ensaye

P2: Peso de la muestra seca después del ensaye y su correspondiente lavado.

Tabla 28. Porcentaje de desgaste del agregado grueso

Desgaste de la Grava	Ensaye 1	Ensaye 2
Peso de la grava (gr)	2502	2500
Peso de la esfera (gr)	4565	4565
Peso final limpio (gr)	1336	1251
% Desgaste	46	50
Promedio (%)	48	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de desgaste obtenido para la grava de 3/8" fue de 48%, este valor está dentro de los porcentajes de desgaste máximo de 50% de la ASTM C 131.

Imagen 6. Carga abrasiva aplicada



Fuente: Elaboración propia

3.4 Caracterización del cemento

A continuación, se presentan los datos obtenidos de la caracterización del cemento:

3.4.1 Determinación de la consistencia normal de pastas de cemento

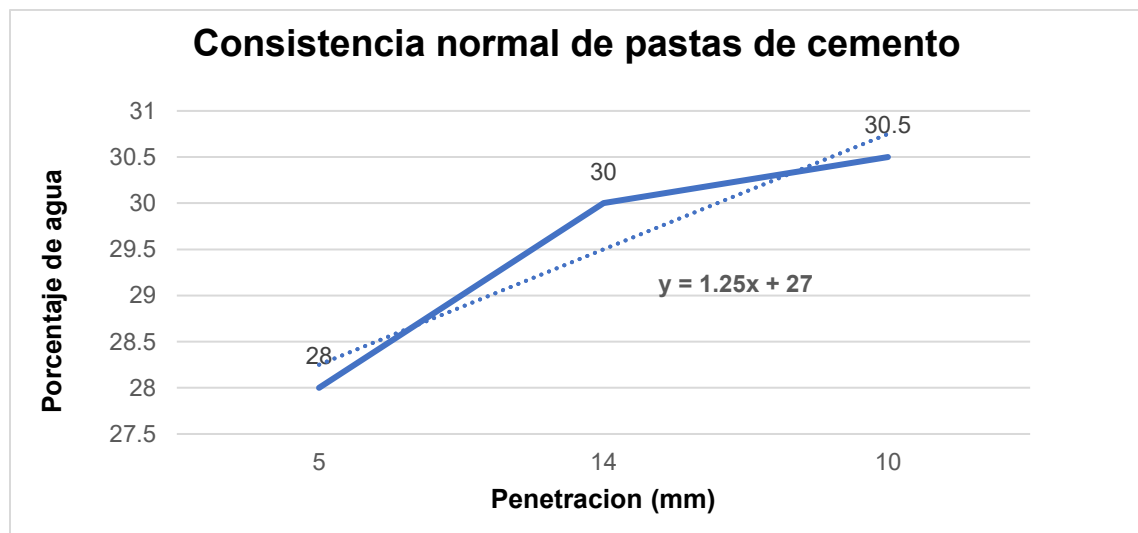
Para determinar la consistencia normal del cemento se empleó el procedimiento establecido en la norma ASTM C-187, método mecánico. El procedimiento se realizó para dos muestras de cemento, por cada muestra se variaron 3 porcentajes de agua respecto a la masa de cemento y se anotaron los resultados de penetración, hasta lograr una penetración de $10 \text{ mm} \pm 1$.

Tabla 29. Consistencia normal del cemento ensayo

Ensaye	Peso de la muestra (grs)	Cantidad de agua (ml)	Penetración (mm)	% Agua
1	650	176	5	28
2	650	194	14	30
3	650	185	10	30.5

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. Consistencia normal del cemento, ensaye 1



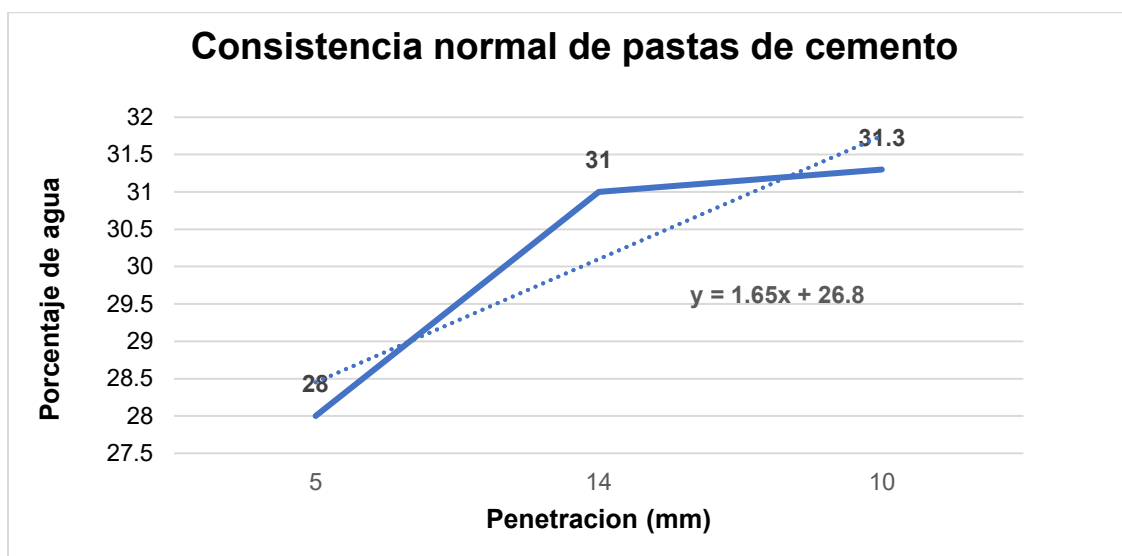
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Consistencia normal del cemento, ensaye 2

Ensaye	Peso de la muestra (grs)	Cantidad de agua (ml)	Penetración (mm)	% Agua
1	650	175.5	6	28
2	650	196	13	31
3	650	187	9	30

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4. Consistencia normal del cemento, ensaye 2



Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, hemos identificado que el porcentaje de agua para obtener la consistencia normal del cemento es de 30.25%, que responde al promedio de los resultados de ambos procedimientos.

3.4.2 Determinación del tiempo de fraguado del cemento por el método de la aguja de Vicat ASTM C 191

El tiempo de fraguado del cemento es el tiempo que pasa desde el momento de la adición del agua hasta cuando la pasta deja de tener fluidez y plasticidad (fraguado inicial) para adquirir un grado de endurecimiento (fraguado final). La determinación de estos dos estados, llamados tiempos de fraguado, se hizo como lo establece la norma ASTM C 191.

Se elaboró una pasta de cemento con el contenido de agua determinado en la prueba de consistencia normal (29%), se introdujo en el molde tronco cónico y en la parte superior se colocó la aguja de Vicat, se hizo penetrar la aguja transcurridos los primeros 30 minutos y se registró el dato como primera lectura. Este procedimiento se repitió cada 15 minutos hasta que la aguja dictó una penetración de 0 mm.

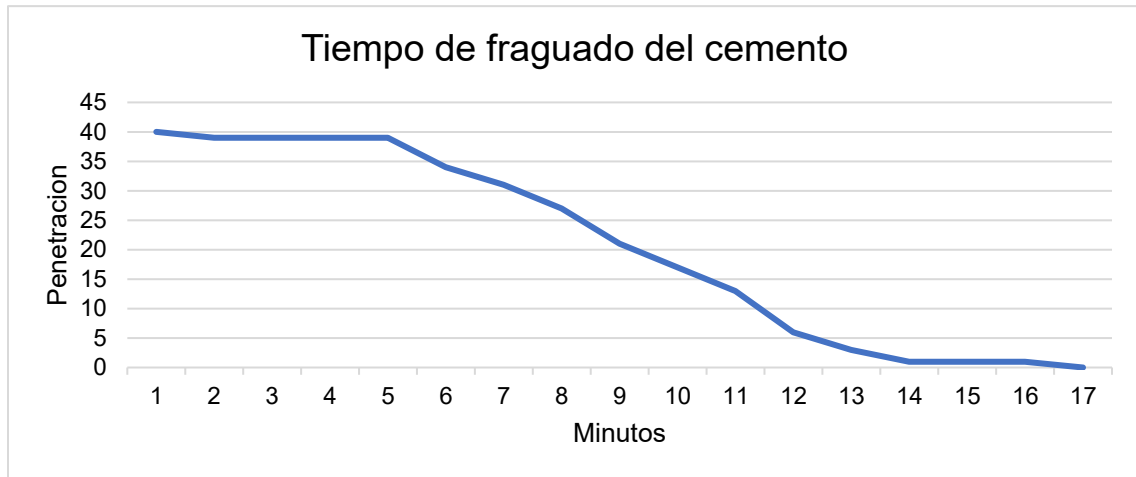
Tabla 31. *Tiempo de fraguado del cemento*

Ensayo 1	Tiempo		Penetración (mm)
	Hora	Minutos	
0	09:00	0	
1	09:30	30	40
2	10:25	45	39
3	10:40	60	39
4	10:55	75	39
5	11:10	90	39
6	11:25	105	34
7	11:40	120	31
8	11:55	135	27
9	12:10	150	21
10	12:25	165	17
11	12:40	180	13
12	12:55	195	6
13	01:10	210	3
14	01:25	225	1
15	01:40	240	1
16	01:55	255	1
17	02:10	270	0

Fuente: *Elaboración propia*

Estos datos de laboratorio se grafican con el propósito de comparar la penetración en función del tiempo. A continuación, se muestra el comportamiento del fraguado de la pasta de cemento.

Gráfico 5. *Tiempo de fraguado del cemento*



Fuente: *Elaboración propia*

El cálculo del tiempo de fraguado inicial se realizó con la siguiente ecuación:

Ecuación:

$$\text{Tiempo de fraguado inicial} = \left[\left(\frac{H - E}{C - D} \right) * (C - 25) \right] + E$$

Donde:

E = tiempo en minutos de la última penetración superior a 25 mm

H = tiempo en minutos de la primera penetración inferior a 25 mm

C = lectura de penetración en el tiempo E

D = lectura de penetración en el tiempo H

Sustituyendo los datos obtenidos en el laboratorio en la ecuación

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de fraguado inicial} &= \left[\left(\frac{150 \text{ min} - 135 \text{ min}}{27 - 21} \right) * (27 - 25) \right] + 135 \\ &= 140 \text{ min} \end{aligned}$$

El resultado de tiempo de fraguado inicial es de 140 minutos.

El fraguado final del cemento se logra identificar para este caso, el resultado es de 270 minutos que serían 4.5 horas. (cuatro horas y media).

3.4.3 Determinación del peso específico relativo del cemento hidráulico

Para la determinación del peso específico del cemento utilizado en las mezclas, se tomó dos muestras y siguiendo la norma ASTM C-188 se llenó el frasco Le Chatelier con kerosene entre las marcas de 0 y 1 ml (volumen inicial), con ayuda de un embudo se introdujo la muestra de cemento (64 grs), se tapó el frasco y se hizo rodar hasta eliminar todas las burbujas de aire contenidas en el frasco, la temperatura fue controlada mediante un baño maría y se registró el volumen final. Se calculó dividiendo la masa de cemento entre el volumen desplazado del disolvente, como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa del cemento}}{\text{Volumen desplazado}}$$

Ecuación:

$$\text{Volumen desplazado} = \text{Lectura inicial} - \text{Lectura final}$$

Tabla 32. Peso específico del cemento

Peso específico del cemento					
Cemento (gr)	Volumen desplazado inicial	Volumen desplazado final	T° inicial C°	T° inicial C°	Peso Específico
64.5	0.9	21.5	26	30	3
64	0.1	20.3	27	30	3.15
Promedio					3.1

Fuente: Elaboración propia

3.5 Caracterización del complemento cementante

Las cenizas de madera, empleadas como material cementante complementario, fueron sometidas a un proceso de cribado progresivo desde la malla No. 16 hasta la No. 100, con el propósito de eliminar impurezas y obtener partículas de mayor finura. De esta manera, se aseguró que la fracción retenida presentara características similares a las del cemento, favoreciendo su desempeño en la mezcla.

3.6 Diseño de mezclas de concreto convencional y con cenizas de madera

Para el presente estudio se seleccionó un concreto con resistencia especificada de 2500 PSI (175.76 kg/cm²), valor que se ubica en el rango de concretos de baja a media resistencia, habitualmente empleados en elementos no estructurales como pisos, banquetas, aceras, cimentaciones ligeras y obras de vivienda. La elección de esta resistencia responde a criterios de seguridad, dado que se incorpora un material cementante complementario innovador, las cenizas de madera, cuyo comportamiento aún no se encuentra plenamente documentado en elementos sometidos a mayores exigencias estructurales.

En este apartado se expone el procedimiento seguido para la elaboración del diseño de mezclas de concreto. Se consideró, en primer lugar, una mezcla patrón sin adición de ceniza y posteriormente, se definieron mezclas con sustitución parcial de cemento por cenizas de madera en proporciones del 10%, 15% y 20%, siguiendo los lineamientos establecidos por el método ACI 211 para la dosificación de concretos.

3.6.1 Diseño de mezclas de concreto utilizando metodología ACI 211

El diseño de la mezcla patrón se desarrolló conforme a lo que dicta el método ACI 211, considerando parámetros normativos como asentamiento, tamaño nominal máximo del agregado y relación agua/cemento, con el propósito de establecer una base confiable para la comparación con las mezclas modificadas.

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para determinar las cantidades que definen la mezcla.

- **Selección de la resistencia promedio requerida**

Esta se determina de acuerdo con lo establecido en el ACI 318, cuando no se dispone de registros de resistencia de probetas de obras anteriores, la resistencia promedio de diseño debe calcularse aplicando incrementos sobre la resistencia especificada.

Tabla 33. Selección de F'_{cr}

Resistencia promedio requerida del concreto (F'_{cr}) cuando no se dispone de	
F'_c	F'_{cr}
Menos de 210	$F'_c + 70$
210 - 350	$F'_c + 84$
>350	$F'_c + 98$

Fuente: ACI 318-19, Tabla 5.3.2.2 (American Concrete Institute, 2019)

Por lo tanto, para una resistencia a diseño de 175.76 kg/cm^2 (2500 PSI), la resistencia requerida es igual a:

$$F'_{cr} = 175.76 \text{ kg/cm}^2 + 70 \text{ kg/cm}^2 = 245.76 \text{ kg/cm}^2$$

- **Definición del contenido de aire atrapado**

El contenido de aire atrapado se determina en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN).

De acuerdo con la granulometría empleada, el TMN corresponde a $\frac{1}{2}$ ", lo que equivale a un valor de 2.5%. Este porcentaje se obtiene de la tabla normativa del ACI 211 relativa al aire atrapado en mezclas de concreto.

Tabla 34. Asignación del contenido de aire atrapado

CONTENIDO DE AIRE ATRAPADO	
TMN DEL AGREGADO GRUESO	Aire atrapado
3/8"	3.0%
1/2"	2.5%
3/4"	2.0%
1"	1.5%
1 1/2"	1.0%
2"	0.5%
3"	0.3%
4"	0.2%

Fuente: ACI 211.1-22, Tabla 6.3.1 (American Concrete Institute, 2022).

- **Determinación del contenido de agua**

El contenido de agua se determinó conforme al método ACI 211, considerando un revenimiento de 3" y un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 1/2", para un concreto sin aire incorporado. Estos parámetros corresponden a concretos de consistencia plástica, adecuados para elementos estructurales comunes, y permiten establecer el volumen unitario de agua requerido para la mezcla patrón, resultando en 216 litros por metro cúbico en este caso.

Tabla 35. Volumen de agua en l/ m³

Agua en l/m ³ , para los tamaños máx. Nominales de agregado grueso y consistencia indicada.								
Asentamiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	

Fuente: ACI 211.1-22, Tabla 6.3.2 (American Concrete Institute, 2022).

- **Selección de la relación a/c**

La relación agua/cemento constituye uno de los parámetros más relevantes en el diseño de mezclas de concreto, pues influye directamente en su resistencia y durabilidad.

En este estudio se partió de una resistencia especificada de 175.76 kg/cm² (2500 PSI), valor que no aparece de manera explícita en las tablas del ACI 211, pero se encuentra entre los valores de 150 y 200 kg/cm². Por ello, la relación a/c se determinó mediante interpolación, obteniéndose un valor de 0.7485.

Tabla 36. Selección de la relación a/c

RELACION A/C POR RESISTENCIA		
f'c	Relacion agua/cemento en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
→ 150	0.8	0.71
→ 200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	
450	0.38	

Fuente: ACI 211.1-22, Tabla 6.3.4 (American Concrete Institute, 2022).

- **Asignación del contenido de cemento**

El contenido de cemento se calculó a partir de la relación agua/cemento y el contenido de agua, despejando así la cantidad de cemento en kilogramos por metro cúbico.

Ecuación:

$$C.Cemento = \frac{216}{0.7485} = 288.6 \text{ kg}$$

- **Cálculo de la cantidad de agregado grueso**

La cantidad de agregado grueso (kg) se determinó a partir de un coeficiente en función de la trabajabilidad y granulometría, que multiplicado por el Peso volumétrico seco compacto (PVSC) de la grava determinado anteriormente.

$$W a_G = 0.53 * 1398.90 \text{ kg/m}^3 = 741.4 \text{ kg}$$

Tabla 37. Determinación del factor para el cálculo del peso del agregado grueso

PESO DEL AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DEL CONCRETO				
	Volumen del agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de finza del fino			
TMN del agregado grueso	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.7
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1-22, Tabla 3 (American Concrete Institute, 2022).

- **Estimación de los volúmenes absolutos**

Con base en las estimaciones previas, se procedió al cálculo de los volúmenes absolutos de materiales y agua por metro cúbico de mezcla, tomando en cuenta el peso específico del cemento y del agua, además de la gravedad específica de la grava. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 38. Volúmenes absolutos de los materiales

Volúmenes absolutos por m ³	
Cemento (m3)	0.092
Agua (lts/m3)	0.216
Aire	0.025
Grava (m3)	0.277
Arena (m3)	0.390
Total (m3)	1

Fuente: Elaboración propia

- **Cálculo de los pesos absolutos de los materiales**

Con base en la estimación de los volúmenes absolutos, se estableció la masa de arena en kg/m³, tomando en cuenta su gravedad específica. Los resultados incluyen todas las cantidades de materiales para la elaboración de 1 m³ de concreto.

Tabla 39. Pesos absolutos de los materiales

Cantidad de material por m ³	
Cemento (kg)	288.577
Arena (kg)	879.728
Grava (kg)	741.417
Agua (lts)	165.25

Fuente: Elaboración propia

- **Corrección de los pesos de los materiales por humedad y absorción**

La corrección de los pesos de los materiales se realizó considerando los efectos de la humedad y la absorción propios de cada agregado. Para ello, se ajustaron los pesos calculados inicialmente, incorporando el contenido de humedad presente y la capacidad de absorción tanto del agregado fino, como el del grueso, con el fin de obtener valores representativos de las condiciones reales de trabajo. De esta manera, los resultados reflejan con mayor precisión las cantidades efectivas de materiales a emplearse en la mezcla.

Tabla 40. Peso de material final para 1 m³ de concreto

Peso del material corregido para 1 m ³	
Cemento (kg)	288.58
Arena (kg)	943.99
Grava (kg)	742.52
Agua (lts)	165.25
Relación a/c	0.57

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las proporciones resultantes, para un metro cúbico de concreto se establecieron en función de las características específicas de los materiales empleados, obteniéndose una relación de 1 parte de cemento, 3.27 partes de arena, 2.57 partes de grava y una relación a/c de 0.57 partes de agua, 1: 3: 2.

Esta dosificación refleja el ajuste realizado conforme a la granulometría del agregado fino —de textura gruesa— y a la densidad relativa de los agregados, garantizando que la mezcla represente adecuadamente las condiciones reales de trabajo.

3.6.2 Proporcionamiento de la mezcla base

Una vez determinadas las cantidades de material por metro cúbico, se definieron las cantidades reales necesarias para la elaboración de cinco cilindros de concreto convencional con dimensiones de 8 × 4 pulgadas. Además, se contempló un porcentaje de 10% de desperdicio en el cálculo de dichas cantidades.

- **Mezcla base de concreto convencional, para 1 m³**

En la tabla se detalla el material necesario para elaborar 1 m³ de concreto de acuerdo a lo que dictan las proporciones del diseño.

Tabla 41. *Diseño de concreto convencional para 1m³, con proporción 1: 3: 2*

Parámetro	Cantidad (gr)
Cemento	2615
Arena	8553
Grava	6728
Agua (lts)	1.50

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Proporcionamiento de las mezclas con porcentajes de ceniza

El diseño de las mezclas con ceniza de madera como material cementante complementario se elaboró siguiendo la misma base utilizada para el concreto convencional. En este caso, se sustituyó el 10 %, 15 % y 20 % del contenido de cemento por ceniza, manteniendo sin cambios las cantidades de agregados, el agua y el número de cilindros considerados en la mezcla de referencia.

Con este procedimiento fue posible analizar cómo la incorporación de ceniza influye en las proporciones y en el comportamiento del concreto, asegurando que las condiciones de comparación con la mezcla convencional fueran consistentes y confiables.

- **Mezcla con 10% de ceniza, para 1 m³**

La siguiente tabla presenta las cantidades de materiales correspondientes al diseño de 1 m³ de concreto en el que se sustituyó el 10 % del cemento por ceniza de madera.

Tabla 42. *Diseño de concreto con 10% de ceniza para 1m³ con proporción 1: 3: 2*

Parámetro	Cantidad (gr)
Ceniza total	261
Cemento total	2353
Arena total	8553
Grava total	6728
Agua total	1.50

Fuente: Elaboración propia

- **Mezcla con 15 % de ceniza, para 1 m³**

La tabla expone las proporciones de materiales calculadas para 1 m³ de concreto con sustitución del 15 % de cemento por ceniza de madera, con los agregados invariables.

Tabla 43. *Diseño de concreto con 15% de ceniza para 1m³ con proporción 1: 3: 2*

Parámetro	Cantidad (gr)
Ceniza total	392
Cemento total	2223
Arena total	8553
Grava total	6728
Agua total	1.50

Fuente: Elaboración propia

- **Mezcla con 20 % de ceniza, para 1 m³**

La siguiente tabla muestra las proporciones de materiales correspondientes al diseño de un metro cúbico de concreto con sustitución del 20 % de cemento por ceniza de madera.

Tabla 44. *Diseño de concreto con 20% de ceniza para 1m³ con proporción 1: 3: 2*

Parámetro	Cantidad (gr)
Ceniza total	523
Cemento total	2092
Arena total	8553
Grava total	6728
Agua total	1,50

Fuente: Elaboración propia

3.7 Elaboración de las mezclas de concreto

Durante esta fase experimental se procedió a la fabricación de las cuatro mezclas de concreto, incorporando las cantidades correspondientes de agregados gruesos y finos junto con los materiales cementantes, conforme a las proporciones definidas en el diseño.

Posteriormente, se evaluaron las propiedades físicas del concreto en estado fresco mediante los ensayos de revenimiento y temperatura, lo que permitió caracterizar su comportamiento inicial. Una vez elaborados los especímenes, se sometieron al proceso de curado controlado, con el propósito de determinar la resistencia a la compresión del concreto endurecido a las edades de 3, 7, 14 y 28 días.

3.7.1 Resultados en estado endurecido

En el análisis del concreto en estado endurecido se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas, considerando principalmente la resistencia a la compresión como parámetro de referencia.

- **Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión constituye el parámetro más representativo para evaluar el desempeño mecánico del concreto en estado endurecido. Los resultados obtenidos muestran que la mezcla convencional alcanza los valores más altos, mientras que las mezclas con sustitución parcial de cenizas presentan reducciones progresivas conforme aumenta el porcentaje de reemplazo. En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos por tipo de mezcla de concreto.

- **Resultados del ensayo de resistencia a la compresión de la mezcla convencional**

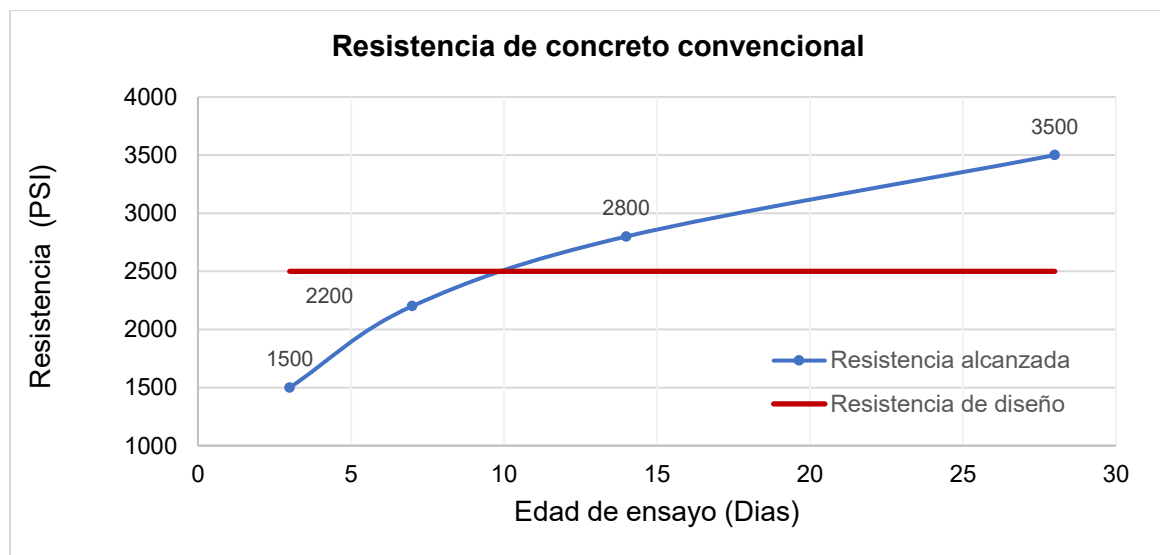
La mezcla convencional se presenta como referencia en el análisis de resistencia a la compresión. Sus valores permiten establecer el punto de comparación frente a las demás mezclas, sirviendo como base para evaluar el efecto de la sustitución parcial de cenizas en el desempeño mecánico del concreto.

Tabla 45. Resultados del ensayo a compresión de la mezcla de concreto convencional

Resistencias de mezcla de concreto convencional		
Proporción 1:3:2	Edad (Días)	Resistencia (PSI)
	3	1500
	7	2200
	14	2800
	28	3500

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto convencional



Fuente: Elaboración propia

- **Resultados del ensayo de resistencia a la compresión de la mezcla con 10% de adición de ceniza de madera**

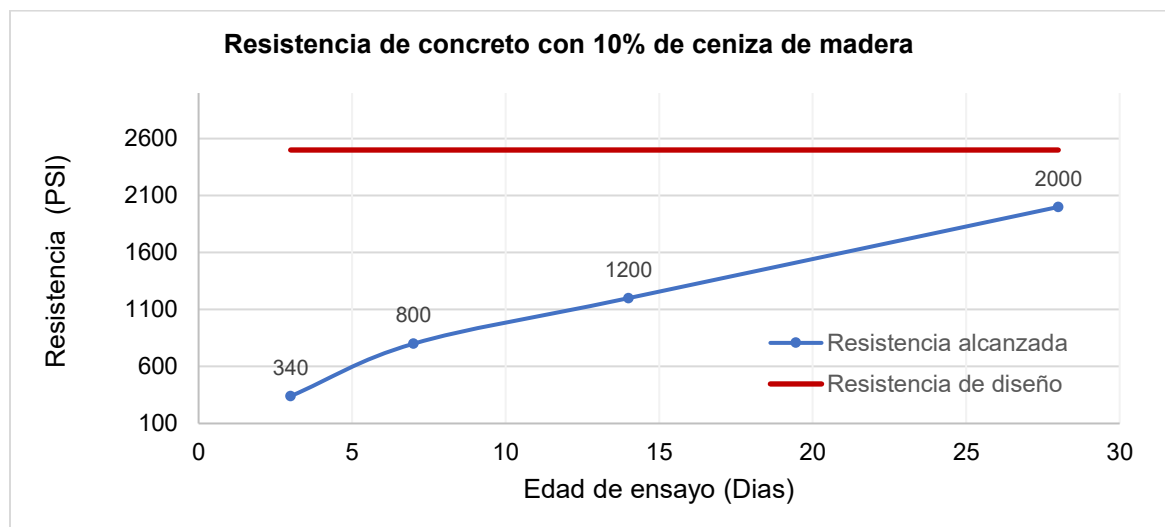
La mezcla con 10% de ceniza muestra una clara disminución en la resistencia a la compresión respecto a la mezcla convencional. Este resultado refleja el inicio de la influencia del material sustituto en las propiedades mecánicas, manteniendo aún un comportamiento aceptable dentro de los parámetros de comparación.

Tabla 46. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 10% de ceniza de madera

Mezcla de concreto con 10% ceniza de madera		
Proporción 1:3:2	Edad (Días)	Resistencia (PSI)
	3	340
	7	800
	14	1200
	28	2000

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 10% de ceniza de madera



Fuente: Elaboración propia

- **Resultados del ensayo de resistencia a la compresión de la mezcla con 15% de adición de ceniza de madera**

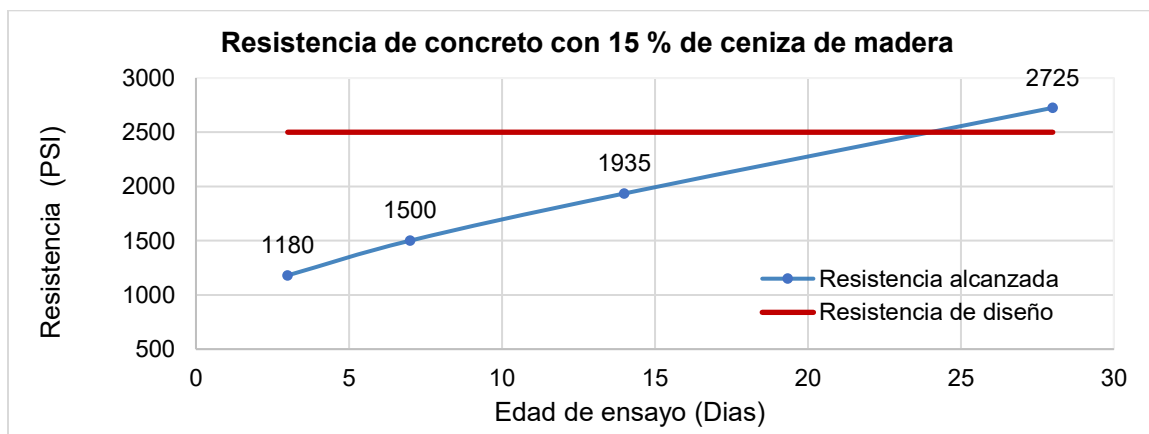
La mezcla con 15 % de ceniza de madera refleja una disminución más evidente en la resistencia a la compresión frente al concreto convencional. Los resultados confirman que el incremento en el porcentaje de sustitución afecta de manera significativa el desarrollo inicial de la resistencia, mostrando valores más bajos en las primeras edades de curado. Sin embargo, a los 28 días el material alcanza aproximadamente 2725 PSI, superando la resistencia de diseño, lo que demuestra que, aunque el desempeño inicial se ve limitado, con un adecuado tiempo de curado la mezcla logra cumplir con los requisitos estructurales y puede considerarse una alternativa viable.

Tabla 47. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 15% de ceniza de madera

Mezcla de concreto con 15% de ceniza de madera		
Proporción 1:3:2	Edad (Días)	Resistencia (PSI)
	3	1180
	7	1500
	14	1935
	28	2725

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 15% de cenizas de madera



Fuente: Elaboración propia

- **Resultados del ensayo de resistencia a la compresión de la mezcla con 20% de adición de ceniza de madera**

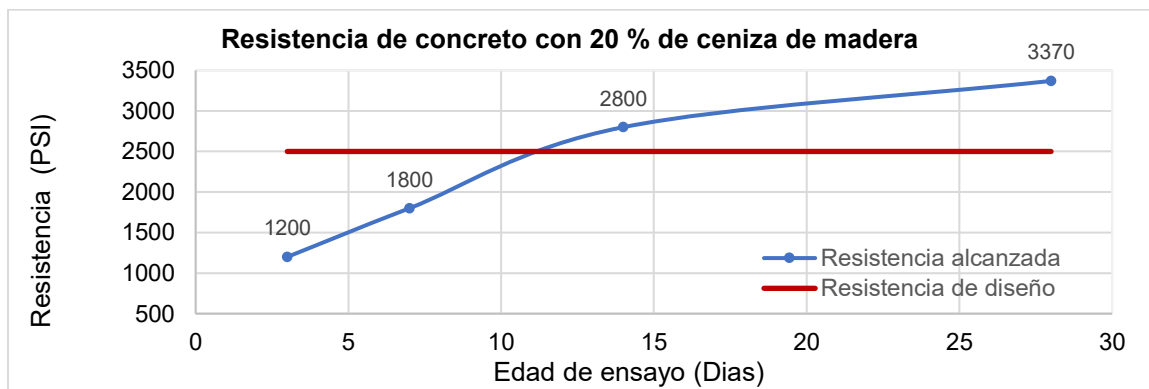
La mezcla con 20 % de ceniza de madera muestra un comportamiento distinto al de porcentajes menores de sustitución. Los resultados evidencian que, aunque en las primeras edades de curado la resistencia se mantiene por debajo del valor de referencia, el incremento con el tiempo es más acelerado: a los 14 días ya se alcanza aproximadamente 2800 PSI, superando la resistencia de diseño, y a los 28 días se llega a cerca de 3370 PSI. Esto confirma que un mayor porcentaje de ceniza afecta el desarrollo inicial de la resistencia, pero también demuestra que, con un curado adecuado, el material logra un desempeño superior al esperado, consolidándose como una alternativa viable siempre que se considere el retraso en la ganancia temprana de resistencia.

Tabla 48. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 20% de ceniza de madera

Mezcla de concreto con 20% de ceniza de madera		
Proporción 1:3:2	Edad (Días)	Resistencia (PSI)
	3	1200
	7	1800
	14	2800
	28	3370

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9. Resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con 20% de cenizas de madera



Fuente: Elaboración propia

3.8 Evaluación comparativa de resultados

El propósito de este apartado es presentar y comparar los resultados obtenidos en las cuatro mezclas de concreto elaboradas durante la fase experimental. La mezcla convencional se establece como referencia, ya que representa el comportamiento esperado de un concreto sin adiciones, frente al cual se contrastan las tres mezclas con sustitución parcial de cenizas de madera.

Este enfoque permite identificar las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas a partir de la incorporación de dicho material, así como analizar la evolución de la resistencia a la compresión en diferentes edades de curado. De esta manera, se busca ofrecer una visión integral del desempeño de las mezclas y establecer comparaciones que faciliten la interpretación de los efectos de la sustitución de cenizas en relación con el concreto tradicional.

3.8.1 Resultados en estado fresco

En el análisis de las propiedades del concreto en estado fresco se determinaron el revenimiento y la temperatura de las cuatro mezclas elaboradas.

Los valores obtenidos se presentan a continuación en las tablas correspondientes.

- **Revenimiento (Slump test)**

Este ensayo constituye un parámetro fundamental para caracterizar el comportamiento inicial del concreto, ya que permite identificar la facilidad de colocación o trabajabilidad.

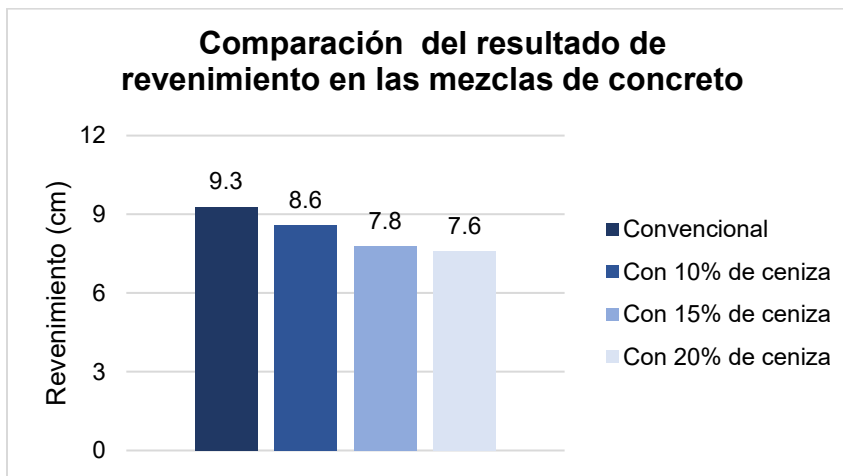
Los valores obtenidos se presentan en la tabla correspondiente y sirven como base para comparar la mezcla convencional con aquellas que incorporan sustitución parcial de cenizas, destacando las variaciones registradas en relación con el concreto de referencia.

Tabla 49. Revenimiento de las mezclas de concreto

Mezcla	Revenimiento	
	cm	in
Convencional	14	5,51
Con 10% de ceniza	10	3,94
Con 15% de ceniza	14	5,51
Con 20% de ceniza	14	5,51

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10. Revenimiento de las mezclas de concreto



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos dejan en evidencia que la incorporación de cenizas reduce la fluidez del concreto fresco, afectando su consistencia respecto a la mezcla base y confirmando el impacto directo del material sustituto en la trabajabilidad.

- **Temperatura**

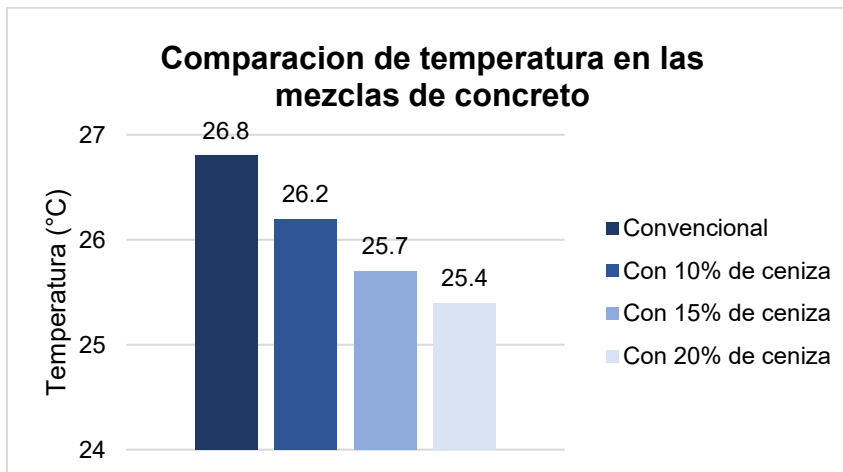
La medición de la temperatura permite identificar variaciones asociadas a la incorporación de materiales sustitutos y constituye un parámetro relevante dentro del control de calidad. Este aspecto influye en la velocidad de hidratación del cemento y, en consecuencia, en el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto, por lo que resulta fundamental para comprender el comportamiento inicial de las mezclas. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 50. Resultados del ensayo de temperatura de las mezclas de concreto

Mezcla	Temperatura
	°C
Convencional	26.8
Con 10% de ceniza	26.2
Con 15% de ceniza	25.7
Con 20% de ceniza	25.4

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11. Resultados de temperatura en las mezclas de concreto



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de temperatura muestran una disminución progresiva conforme aumenta el porcentaje de sustitución de cenizas. Esta tendencia confirma que la incorporación de cenizas reduce ligeramente la temperatura inicial del concreto fresco respecto a la mezcla base.

En conclusión, al analizar en conjunto los resultados de revenimiento y temperatura en estado fresco, se observa una tendencia: ambos parámetros disminuyen de manera progresiva conforme aumenta el porcentaje de sustitución de cenizas. La mezcla convencional mostró los valores más altos, mientras que las mezclas con 10%, 15% y 20% de cenizas reflejaron reducciones graduales tanto en la trabajabilidad como en la temperatura inicial. Estos hallazgos revelan que la incorporación de cenizas no solo modifica la consistencia del concreto, sino también su comportamiento térmico, aspectos que resultan esenciales para comprender cómo se desempeñará el material en condiciones reales de obra.

3.8.2 Resumen de resultados de las pruebas de resistencia a la compresión en todas las mezclas

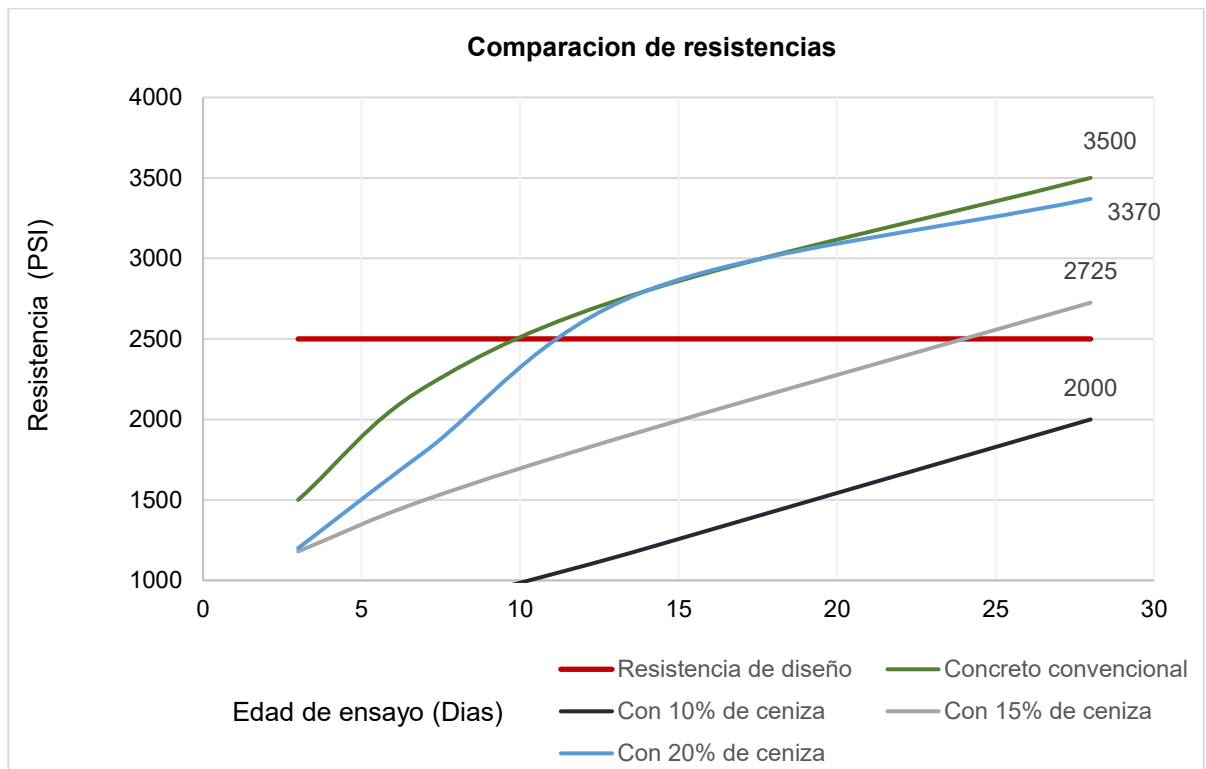
El análisis de la resistencia a la compresión evidencia diferencias significativas entre la mezcla convencional y aquellas con sustitución parcial de cenizas. La mezcla convencional alcanzó los valores más altos en todas las edades de ensayo, consolidándose como referencia en desempeño mecánico. Entre las mezclas con sustitución, la de 20% de ceniza mostró un comportamiento más cercano al diseño convencional en la edad de 28 días, con un valor de 3370 PSI, superior al registrado por las mezclas con 10% y 15% de ceniza en la misma edad. Este resultado sugiere que, aunque la incorporación de cenizas tiende a reducir la resistencia, el porcentaje de 20% presenta un desempeño más competitivo en el largo plazo respecto a las demás sustituciones, aproximándose en mayor medida al comportamiento de la mezcla base.

Tabla 51. Comparación de los resultados de resistencia a compresión del concreto

Mezcla	Edad de ensayo			
	3	7	14	28
	PSI	PSI	PSI	PSI
Convencional	1500	2200	2800	3500
Con 10% de ceniza	340	800	1200	2000
Con 15% de ceniza	1180	1500	1935	2725
Con 20% de ceniza	1200	1800	2800	3370

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 12. Resistencia a compresión del concreto



Fuente: Elaboración propia

3.9 Evaluación del uso de material cementante

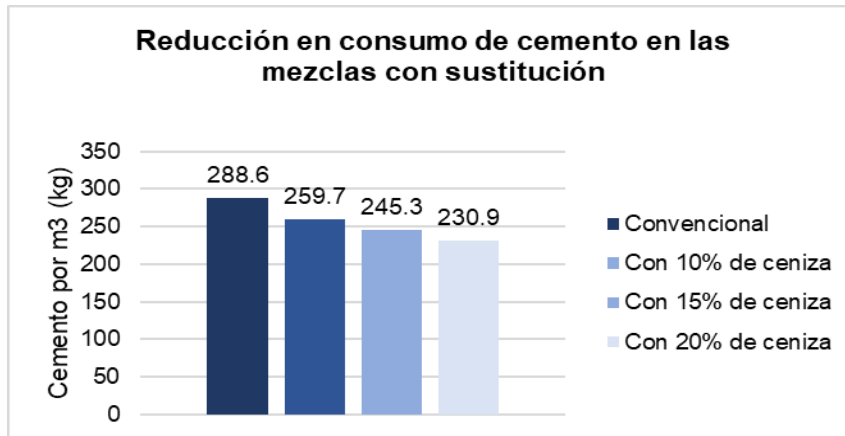
Los resultados muestran que el consumo de cemento disminuye de manera proporcional al porcentaje de reemplazo, lo que se traduce en una reducción significativa de la demanda de este insumo en comparación con la mezcla convencional. Este comportamiento evidencia una mayor eficiencia en el aprovechamiento de recursos y aporta beneficios en términos de sostenibilidad, al disminuir las emisiones asociadas a la producción de cemento y al incorporar un subproducto como material alternativo.

Tabla 52. Cantidades de cemento por metro cubico en todas las mezclas

Mezcla	Consumo de cemento (kg/m ³)	Sustitución con cenizas (kg/m ³)	Reducción de cemento (%)
Convencional	288.6	0	0
Con 10% de ceniza	259.7	28.9	10
Con 15% de ceniza	245.3	43.3	15
Con 20% de ceniza	230.9	57.7	20

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 13. Consumo de cemento por cada tipo de mezcla



Fuente: Elaboración propia

El análisis del consumo de cemento por cada tipo de mezcla evidencia una tendencia clara de reducción conforme aumenta el porcentaje de sustitución con ceniza de madera. La mezcla convencional presenta un consumo de 288.6 kg/m³, mientras que con 10 % de ceniza se reduce a 259.7 kg/m³, con 15 % a 245.3 kg/m³, y finalmente con 20 % a 230.9 kg/m³.

Esta disminución progresiva confirma que la incorporación de ceniza permite optimizar el uso de cemento, generando beneficios tanto económicos como ambientales al reducir la demanda de un recurso de alto impacto energético. En términos prácticos, el menor consumo de cemento contribuye a la eficiencia en la producción de concreto y a la sostenibilidad del proceso constructivo, siempre que se garantice que las propiedades mecánicas de las mezclas se mantengan dentro de los rangos establecidos por la ASTM C150 para cementos portland.

Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones

El presente capítulo reúne los principales hallazgos obtenidos en la investigación, organizados en conclusiones y en recomendaciones orientadas a la aplicación de los resultados.

4.1 Conclusiones

- Los materiales empleados en las mezclas de concreto cumplieron con las condiciones de calidad establecidas por las normas ASTM. Las pruebas de granulometría, humedad, absorción y gravedad específica confirmaron su capacidad para producir un concreto confiable. El agregado fino, con un módulo de finura de 3, se clasificó como arena gruesa y requirió ajustes en la cantidad de agua por su alta absorción, mientras que el agregado grueso de 3/8" aportó estabilidad y permitió definir proporciones adaptadas (1:3:2).
- La mezcla convencional de referencia alcanzó 3500 PSI a los 28 días, mostrando un desarrollo progresivo y estable desde edades tempranas. Al incorporar cenizas de madera como material cementante complementario, se observaron variaciones en la resistencia: con 10 % de sustitución la resistencia fue 2000 PSI, con 15 % se logró un desempeño 2725 PSI, y con 20 % se alcanzaron valores muy cercanos al convencional con 3370 PSI. Estos resultados evidencian que el porcentaje de sustitución influye en el comportamiento mecánico del concreto.
- La comparación demostró que el concreto convencional mantiene mayor resistencia y estabilidad, mientras que las mezclas con ceniza presentan variaciones según el nivel de sustitución. Aunque todas las mezclas con ceniza mostraron menor resistencia inicial, el incremento fue constante y, en el caso del 20 %, incluso superó la resistencia de diseño en etapas intermedias. Desde una perspectiva ambiental y económica, el uso de cenizas de madera constituye una alternativa sostenible, ya que reduce el consumo de cemento y aporta beneficios al sector de la construcción, aunque su aplicación debe ajustarse al nivel de exigencia estructural requerido.

4.2 Recomendaciones

- Se aconseja realizar pruebas adicionales con diferentes dosificaciones de ceniza de madera, con el fin de identificar la proporción óptima para aplicaciones específicas.
- Se sugiere fortalecer el control de calidad y ampliar la investigación sobre el material, dado que su desempeño depende directamente de sus propiedades físicas y químicas.
- Es conveniente evaluar periódicamente el comportamiento del concreto con ceniza de madera en condiciones reales de servicio, para garantizar su durabilidad y desempeño estructural a largo plazo.
- Se recomienda evaluar el comportamiento del concreto en edades superiores a 56 y hasta 90 días, considerando la posible actividad puzolánica tardía de las cenizas.
- El uso de cenizas de madera puede considerarse viable en elementos no estructurales, tales como aceras, bordillos y rellenos, donde las exigencias mecánicas son menores y el beneficio ambiental resulta más relevante.
- Finalmente, se recomienda continuar investigando el empleo de residuos agroindustriales en la producción de concreto, con el propósito de promover materiales más sostenibles, económicos y respetuosos con el medio ambiente

Bibliografía

- 360 en Concreto. (2024, septiembre 12). 360 en Concreto. <https://360enconcreto.com>
- Abanto Castillo, J. (2025). *Tecnología del concreto y sus aplicaciones* (pp. 12–13). Editorial Universitaria.
- ACI. (1991). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). *Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. ASTM.
- Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO). (2010). *Manual de construcción en concreto* (p. 27). ASOCRETO.
- Asociación Española de Hormigón y Cemento. (2024). *Manual de concretos especiales* (p. 67). AEHC.
- ASTM. (2009). *ASTM C-231. Contenido de aire por el método de presión*. ASTM.
- ASTM. (2013). *Standard specification for concrete aggregates*. ASTM.
- ASTM. (2017). *ASTM C172. Prácticas para muestreo de concreto fresco*. ASTM International.
- ASTM C1064. (s.f.). *Método de ensaye estándar para la medición de la temperatura del concreto*. ASTM International.
- ASTM C231. (s.f.). *Contenido de aire por el método de presión*. ASTM C231.
- ASTM C29. (s.f.). *Método de ensayo para determinar la densidad aparente (peso unitario) y vacío en los agregados*. ASTM International.
- ASTM C39. (s.f.). *Resistencia a la compresión de cilindros de concreto*. ASTM International.
- ASTM International. (2001). *ASTM C127-01: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (2003). *ASTM C33: Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International.

- ASTM International. (2013). *ASTM C566: Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying* (pp. 2–4). ASTM International.
- ASTM International. (2015). *ASTM C127: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate* (pp. 3–8). ASTM International.
- ASTM International. (2015). *ASTM C128: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate* (pp. 4–9). ASTM International.
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M-17a: Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate* (pp. 3–8). ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C1602: Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete* (pp. 3–6). ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C188: Standard test method for density of hydraulic cement* (pp. 3–5). ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C191: Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle* (pp. 6–8). ASTM International.
- ASTM International. (2020). *ASTM C1157: Standard performance specification for hydraulic cement* (pp. 12–14). ASTM International.
- ASTM International. (s.f.). *ASTM C143: Standard test method for slump of concrete*. ASTM International.
- BSI. (1997). *Concrete - Part 1: Guide to specifying concrete*. BSI.
- CEB-FIP. (1990). *CEB-FIP model code 1990: Design code*.
- Cement Sustainability Initiative (CSI). (2012, junio). *CSI: 10 years of progress*. <https://docs.wbcsd.org/2015/11/CSI-10YearsOfProgress.pdf>
- Cemex. (2018). *Concreto convencional*. Cemex.
- Cemex. (2018). *Guía práctica del concreto* (p. 14). Cemex México.
- Concrelab. (2023). *Concretos sostenibles y permeables* (p. 21). Concrelab.

- Concrelab. (2023, abril). *Los diferentes tipos de concretos y sus usos*. Concrelab.
- Concreto convencional. (2025). <https://www.cemexnicaragua.com/productos-y-servicios/concreto/convencional>
- Concreto en la obra: problemas, causas y soluciones. (2012). *Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión*. IMCYC.
- Comunidad 360 en Concreto. (2023). *Técnicas y normativas de los agregados*.
- COVENIN. (2021). *Concreto. Agregados. Requisitos (4ta revisión)*. Servicio Desconcentrado de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos (SENCAMER).
- Chorres Majuan, J. L. M., & Pérez Romero, J. A. (2024). *Uso de cenizas de viruta de madera para mejorar las propiedades mecánicas del concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$* (p. 33). Universidad César Vallejo.
- Densidad total y vacío en agregados. (s.f.). *Laboratorio de materiales de construcción*. UCA.
- Domat Concrete Machinery. (2025). *Concreto y construcción moderna*. Domat Concrete Machinery.
- Efectos de la ceniza de madera en las propiedades del hormigón y del relleno fluido. (2016, julio). <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=69808>
- Fiallos-Lezcano, J. A., Rodríguez-Veliz, M. M., & Guerra-Mera, J. C. (2024). *Incidencia de la relación agua-cemento en la resistividad del hormigón*. *Politécnica de Concreto*, 9(2), 710–724.
- Flores Huamán, J. F., & Noriega Guzmán, G. J. (2024). *Influencia de la relación agua/cemento en la porosidad, absorción, densidad y resistencia a la compresión del concreto cemento-arena de mediana resistencia*. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Gartner, E. (2018). *Alternative cement clinkers*. *Cement and Concrete Research*, 114, 27–39.
- Guía de agregados para construcción. (2023). *Manual técnico de agregados* (pp. 19–20). Editorial Técnica.

- Hewlett, P. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete* (pp. 73–75). Elsevier.
- Hewlett, P. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Elsevier.
- IBRACON. (2016). *Guia para dosagem e controle do concreto*. IBRACON.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2024). *Concretos de alta resistencia: diseño y aplicaciones* (pp. 37–38). IMCYC.
- International Energy Agency. (2019). *Technology roadmap: Low-carbon transition in the cement industry* (pp. 12–15). IEA Publications.
- McCormack, J. C. (2011). *Design of reinforced concrete* (10th ed., p. 25). Wiley.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (p. 89). Pearson Education.
- Neville, A. M. (2012). *Propiedades del concreto*. McGraw-Hill.
- Sánchez, R. (2001). *Tecnología del concreto* (pp. 45–46). Editorial Limusa.
- Sánchez, R. (2022). *Aprovechamiento de residuos de biomasa en la construcción* (pp. 62–65). Editorial Limusa.
- Sánchez de Guzmán, J. (2001). *Tecnología del concreto*. Editorial Limusa.
- Sánchez de Guzmán, R. (2001). *Tecnología del concreto* (p. 58). Editorial Limusa.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2024). *Manual de construcción con concreto reforzado* (p. 52). SCI.
- SonProject Ingeniería Civil. (2024). *Propiedades y clasificación de agregados* (pp. 41–42). SonProject.
- SonProject Ingeniería Civil. (2024). *Agregados para el concreto: guía completa*. <https://sonproject.com>
- Universidad Nacional de Trujillo. (2023). *Tecnología del concreto: caracterización y diseño de mezcla de agregados*. Facultad de Ingeniería Civil.
- Vallejos-Peltroche, D. G. (2023). *Revisión sistemática de las propiedades físico-mecánicas del hormigón con incorporación de ceniza de madera* (pp. 45–48).

Anexos

Imagen 7. Prueba de revenimiento



Fuente: Elaboración propia

Imagen 8. Materiales para la fabricación del concreto



Fuente: Elaboración propia

Imagen 9. Batida de mezcla



Fuente: Elaboración propia

Imagen 10. Preparación de agregados para fabricación de concreto



Fuente: Elaboración propia

Imagen 11. Ceniza de madera tamizada



Fuente: Elaboración propia

Imagen 12. Muestra de arena reducida a tamaño de ensaye



Fuente: Elaboración propia

Imagen 13. Método de la balanza hidrostática para determinar la gravedad específica del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Imagen 14. Método del picnómetro para determinar la gravedad específica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Imagen 15. Secado de muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 16. Medición de revenimiento



Fuente: Elaboración propia

Imagen 17. Cilindros de concretos fabricados



Fuente: Elaboración propia

Imagen 18. Curado de cilindros de concreto



Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Diseño de concreto con 10% de ceniza para 1m3

Parámetro	Símbolo	Valor Estimado	Unidad
Diámetro de la probeta	d	0.051	m
Altura de la probeta	h	0.203	m
Volumen por probeta	Vp	0.002	m3
Número de probetas	n	5.000	-
Porcentaje de desperdicio	p	0.1	%
Porcentaje de adición de ceniza	c	0.1	%
Cemento por m ³	C	259.719	kg/m ³
Ceniza por m ³	c	28.858	kg/m ³
Relación agua/cemento+ceniza	a/c	0.573	-
Agua por m ³	W	165.253	lts
Arena por m ³	S	943.993	kg/m ³
Grava por m ³	G	742.517	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Diseño de concreto con 10% de ceniza para cinco cilindros

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Ceniza total	ct	261	gr
Cemento total	Ct	2353	gr
Arena total	St	8553	gr
Grava total	Gt	6728	gr
Agua total	At	1.50	lts

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Diseño de concreto con 15% de ceniza para 1m3

Parámetro	Símbolo	Valor Estimado	Unidad
Radio de la probeta	d	0.051	m
Altura de la probeta	h	0.203	m
Volumen por probeta	Vp	0.002	m3
Número de probetas	n	5.000	-
Porcentaje de desperdicio	p	0.1	%
Porcentaje de adición de ceniza	c	0.15	%
Cemento por m ³	C	245.291	kg/m ³
Ceniza por m ³	c	43.287	kg/m ³
Relación agua/cemento+ceniza	a/c	0.573	-
Agua por m ³	W	165.253	lts
Arena por m ³	S	943.993	kg/m ³
Grava por m ³	G	742.517	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Diseño de concreto con 15% de ceniza para cinco cilindros

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Ceniza total	ct	392	gr
Cemento total	Ct	2223	gr
Arena total	St	8553	gr
Grava total	Gt	6728	gr
Agua total	At	1.50	lts

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Diseño de concreto con 20% de ceniza para 1m³

Parámetro	Símbolo	Valor Estimado	Unidad
Radio de la probeta	d	0.051	m
Altura de la probeta	h	0.203	m
Volumen por probeta	Vp	0.002	m ³
Número de probetas	n	5	-
Porcentaje de desperdicio	p	0.1	%
Porcentaje de adición de ceniza	c	0.2	%
Cemento por m ³	C	230.862	kg/m ³
Ceniza por m ³	c	57.715	kg/m ³
Relación agua/cemento+ceniza	a/c	0.573	-
Agua por m ³	W	165.253	lts
Arena por m ³	S	943.993	kg/m ³
Grava por m ³	G	742.517	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Diseño de concreto con 20% de ceniza para cinco cilindros

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Ceniza total	ct	523	gr
Cemento total	Ct	2092	gr
Arena total	St	8553	gr
Grava total	Gt	6728	gr
Agua total	At	1.50	lts

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59. Total de materiales para fabricar 20 cilindros de 8*4in

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Cemento total	Ct	6667.56	gr
Ceniza total	ct	1176.63	gr
Agua total	At	4.49	ltrs
Arena total	St	25659.89	gr
Grava total	Gt	20183.30	gr

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. Resumen de características de los agregados

Material	Parámetro							
	TM	TMN	MF	Gs	%Absorción	%Humedad	PVSC (kg/m3)	%Vacios
Arena	-	-	3.0	2.26	5.43	7.31	1577.37	30.07
Grava	1/2"	1/2"	-	2.67	2.41	0.15	1398.90	47.67

Tabla 61. Diseño de concreto sin de ceniza para 1m3

Parámetro	Símbolo	Valor Estimado	Unidad
Radio del cilindro	d	0.051	m
Altura del cilindro	h	0.203	m
Volumen del cilindro	Vp	0.002	
Número de cilindros	n	5	-
Porcentaje de desperdicio	p	0.1	-
Cemento por m ³	C	288.6	kg
Relación agua/cemento	a/c	0.57	-
Agua por m ³	W	165.253	ltrs
Arena por m ³	S	943.993	kg
Grava por m ³	G	742.517	kg

Tabla 62. Diseño de concreto sin de ceniza para cinco cilindros

Parámetro	Cantidad	Unidad
Cemento	2615	gr
Arena	8553	gr
Grava	6728	gr
Agua	1.50	ltrs